

Masa Depan Energi Panas Bumi di Indonesia

ERA BARU YANG MELIMPAH UNTUK PENDINGINAN, INDUSTRI BERSIH, DAN ENERGI



Masa Depan Energi Panas Bumi di Indonesia

Era Baru dengan Pendinginan, Industri, dan Energi Bersih yang Melimpah

Editor:

Jackson Grimes

Drew Nelson

project innerspace™

IESR
Institute for Essential Services Reform

Project InnerSpace
SOME RIGHTS RESERVED



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Unless otherwise noted, all photo credits are Shutterstock.

Daftar Isi Buku

Penulis Utama 5

Penulis Kontributor 11

Editor 12

Ucapan Terima Kasih 13

Daftar Gambar 14

Daftar Istilah 18

Daftar Singkatan 21

Ringkasan Eksekutif 23

BAGIAN I

Pengetahuan Dasar Panas Bumi

1. Panas Bumi 101: Gambaran Umum tentang Teknologi dan Aplikasi Panas Bumi Terbaru 37
   Project InnerSpace

BAGIAN II

Lanskap dan Kunci Pertumbuhan Panas Bumi Indonesia

2. Menggerakkan Transisi: Pasar dan Peluang Panas Bumi Indonesia 56
   Raditya Wiranegara dan His Muhammad Bintang

3. Bagian 1: Di Dasar Kepulauan: Sistem Panas Bumi Konvensional Indonesia 82
   Pri Utami, Kartika Palupi Savitri, dan Yan Restu Freski

   Bagian 2: Memperluas Cakupan: Peluang Pengembangan Panas Bumi Generasi Baru 102
   Higinia Torregrosa

4. Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung di Indonesia 119
   Adi Susilo, Daniel W. Adityatama, M. Rizqi Al Asy'ari, dan Vincentius A. Brilian

5. Mempersiapkan Tenaga Kerja Masa Depan: Peran Tenaga Kerja dan Institusi Sektor Minyak dan Gas Indonesia 170
   Filda C. Yusgiantoro, Massita Ayu Putriastuti, dan Hidayatul M. Rohmawati

BAGIAN III

Alat dan Jalur Kebijakan untuk Pemangku Kepentingan dan Pengelolaan Lingkungan

6. Jejak Bersama: Membangun Kepercayaan dan Transparansi dalam Transisi Energi Indonesia 191
   Filda C. Yusgiantoro dan Michael Suryaprawira

7. Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia 215
   Reananda Hidayat Permono dan Fabby Tumiwa

8. Menciptakan Panas Bumi Hijau: Menjaga Alam dan Masyarakat melalui Panas Bumi Generasi Baru 243
   Aisah Taufik Hidayat Abdullah dan Shahnaz Nur Firdausi

Penulis Utama

(sesuai urutan abjad)



Aisah Taufik Hidayat Abdullah (Aisyah) adalah analis sistem informasi geografis (GIS) di Institute for Essential Services Reform (IESR). Ia mengembangkan model data geospasial, memetakan potensi energi terbarukan, menganalisis citra satelit, dan melakukan studi spasial untuk mendukung transisi energi Indonesia. Abdullah meraih gelar magister dalam bidang geomatika dari Universitas Babeș-Bolyai dan mengikuti program pertukaran Erasmus di Universitas Coimbra, dengan fokus pada rekayasa informasi geospasial. Ia memperoleh gelar sarjana dalam bidang geofisika dari Universiti Sains Malaysia, di mana ia ikut serta dalam penelitian lapangan di Ulu Slim, Perak, untuk menilai prospek panas bumi menggunakan metode seismik, resistivitas, magnetik, ground-penetrating radar, dan penginderaan jauh. Selama pandemi COVID-19, ia bertugas di Emergency Spatial Support Center di perusahaan perangkat lunak GIS, menyiapkan dan mengoptimalkan data spasial serta membangun solusi untuk manajemen bencana dan tanggap darurat.



Daniel Wilhelmus Adityatama adalah insinyur panas bumi senior dan manajer proyek di PT Geoenergi Solusi Indonesia (Geoenergis), tempat ia memimpin proyek-proyek teknik, pengeboran, dan penelitian. Ia memegang gelar magister dalam bidang energi dari Universitas Auckland dan gelar sarjana teknik dalam bidang teknik metalurgi dan material dari Universitas Indonesia. Publikasinya mencakup topik aplikasi pemanfaatan langsung panas bumi, model bisnis penggunaan sendiri untuk industri, optimasi pengeboran, dan strategi pengembangan proyek. Ia juga memberikan konsultasi mengenai pengembangan proyek dan kelayakan bagi pengembang panas bumi, lembaga pemerintah, dan lembaga keuangan.



Muhammad Rizqi Al Asy'ari adalah insinyur panas bumi dan manajer proyek industri energi. Ia telah memainkan peran kunci dalam lebih dari 30 proyek beragam di lebih dari 10 lapangan panas bumi, minyak, dan gas bumi. Kemampuannya mencakup manajemen proyek panas bumi secara menyeluruh, mulai dari rekayasa pengeboran dan penilaian sumber daya hingga teknologi pembangkit listrik, pembiayaan proyek, dan pemanfaatan langsung panas bumi. Al Asy'ari memiliki pengalaman luas bekerja dengan lembaga keuangan internasional dalam *due diligence* teknis proyek energi. Ia telah menulis lebih dari 40 publikasi penelitian dan berkontribusi dalam lebih dari 50 kegiatan sukarela sebagai pembicara tamu dan juri dalam kompetisi energi. Salah satu publikasinya yang terbaru, "*Beyond Electricity: Model Bisnis Penggunaan Langsung Geotermal dan Aplikasi Potensial di Indonesia*," diterbitkan dalam Stanford Geothermal Workshop pada tahun 2024.



His Muhammad Bintang adalah analis di Institute for Essential Services Reform (IESR). Ia telah bekerja di bidang kebijakan transisi energi, sistem tenaga listrik, dan ekonomi teknologi bersih. Pekerjaan Bintang di IESR bertujuan untuk menghubungkan analisis teknis dengan rekomendasi kebijakan dan mendukung integrasi teknologi bersih yang sedang berkembang ke dalam strategi energi nasional. Bintang memiliki gelar magister dalam bidang teknik energi dan lingkungan dari Korea University of Science and Technology. Sebelumnya, ia bekerja sebagai peneliti baterai di Korea Institute of Science and Technology.



Vincentius Adven Brilian adalah insinyur reservoir dan produksi panas bumi dengan lebih dari tiga tahun pengalaman di bidang konsultasi dan penelitian akademik. Hingga tahun 2025, Brilian telah berkontribusi dalam konsultasi teknis, proyek *due diligence*, dan penelitian akademik di Indonesia. Ia juga pernah bekerja di Turki. Kliennya meliputi operator lapangan, lembaga pembiayaan, dan lembaga pemerintah. Ia telah menerbitkan tiga artikel jurnal internasional sebagai peer-reviewer dan terindeks di Scopus, serta menjadi penulis utama pada sembilan prosiding konferensi, yang mencakup panas bumi dan penangkapan, pemanfaatan, dan penyimpanan karbon (CCUS). Dua artikel yang menonjol adalah "*Technical Initiatives to Develop Low–Medium Temperature Geothermal Resources in Indonesia: Learned from the United States*" dan "*Sedimentary Basin Ranking for an Integrated CO_2-Based Enhanced Gas Recovery and Geothermal Heat Extraction from Natural Gas Reservoirs: A Case Study in Western Indonesia*," keduanya diterbitkan dalam Geoenergy Science and Engineering pada tahun 2025. Brilian meraih gelar Master of Energy dari Universitas Auckland.

Shahnaz Nur Firdausi adalah analis iklim dan energi di Institute for Essential Services Reform (IESR). Ia memiliki gelar sarjana dalam bidang biologi dan gelar magister dalam biomanajemen dari Institut Teknologi Bandung. Dengan pengalaman sekitar lima tahun dalam bidang isu iklim dan energi, Firdausi telah melakukan penelitian tentang bioenergi, upaya mitigasi iklim Indonesia, aspek lingkungan dalam pengembangan energi, dan dampak sosial-ekonomi dari transisi energi yang berkeadilan. Pekerjaannya saat ini berfokus pada percepatan penerapan energi terbarukan dan pengurangan emisi karbon sebagai bagian dari agenda mitigasi perubahan iklim Indonesia. Pekerjaan Firdausi bertujuan untuk mendukung jalur dekarbonisasi Indonesia dan mencapai target emisi nol bersih untuk mengatasi darurat iklim global.





Dr. Yan Restu Freski adalah dosen dan peneliti di Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada (UGM) di Indonesia. Ia memperoleh gelar sarjana dan magister dalam bidang geologi dari UGM. Ia meraih gelar doktor pada tahun 2024 dari Fakultas *Geo-Information Science and Earth Observation* di Universitas Twente, Belanda, dengan dukungan penuh dari Beasiswa Program *Geothermal Capacity Building Programme–Indonesia-Netherlands* (GEOCAP) yang didanai oleh Kementerian Luar Negeri Belanda. Di UGM, Freski merupakan bagian dari Kelompok Riset Geodinamika, Kelompok Riset Geosains Komputasional, dan Kelompok Riset Sumber Daya Geologi Non-Konvensional. Freski fokus pada geomorfologi, pemantauan geologi jarak jauh, dan aplikasi LiDAR untuk memahami sistem dinamis bumi dan mendukung pengembangan sumber daya yang berkelanjutan.



Reananda Hidayat Permono bekerja sebagai staf program transformasi sistem energi di Institute for Essential Services Reform (IESR). Permono memiliki gelar sarjana teknik geofisika dari Institut Teknologi Bandung. Setelah menyelesaikan gelar magister geologi dari Curtin University, Permono bekerja di bidang eksplorasi minyak dan gas bumi di Timor Timur selama tujuh tahun. Di IESR, pekerjaan Permono terutama berfokus pada advokasi kebijakan transisi energi melalui analisis teknis dan rekomendasi kebijakan, dengan fokus pada isu dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan dan inisiatif mobilitas berkelanjutan.



Massita Ayu Cindy Putriastuti adalah Manajer Departemen Riset di Purnomo Yusgiantoro Center dan kandidat doktor di Universitas Indonesia, dengan gelar sarjana dan magister dalam bidang teknik geofisika dari Institut Teknologi Bandung. Dengan lebih dari delapan tahun pengalaman dalam menghubungkan aspek teknis, kebijakan, dan kelembagaan sektor energi Indonesia, ia telah memimpin proyek-proyek multi-pihak yang terkait dengan pemerintah, termasuk interaksi dengan kementerian dan perusahaan negara seperti PLN dan Pertamina. Ia juga pernah menjadi penasihat kebijakan untuk beberapa proyek seperti penggunaan energi di pabrik peleburan dan tata kelola tenaga kerja dalam transisi energi. Karyanya menghubungkan pemahaman geosains dengan ekonomi energi dan reformasi institusional, dengan fokus pada jalur transisi lintas sektor. Ia juga telah menerbitkan artikel opini dan analisis di *The Diplomat*, *The Jakarta Post*, *Kompas*, *The Conversation*, dan *Lowy Institute*, untuk mempromosikan kebijakan transisi energi yang inklusif dan berbasis bukti.





Hidayatul Mustafidah Rohmawati adalah asisten peneliti di Purnomo Yusgiantoro Center (PYC), yang berfokus pada energi berbasis bio dan sektor industri hijau. Ia lulus dengan gelar sarjana teknik kimia dari Universitas Brawijaya dan sedang menempuh program magister teknik perminyakan di Institut Teknologi Bandung, dengan fokus pada sistem manajemen energi berkelanjutan. Di PYC, ia telah mengerjakan beberapa proyek penelitian, termasuk konversi gas petroleum cair menjadi gas alam cair untuk usaha mikro, kecil, dan menengah, serta reformasi sektor infrastruktur energi. Saat ini, ia terlibat dalam beberapa proyek penelitian seperti integrasi penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) dan penangkapan, pemanfaatan, dan penyimpanan karbon (CCUS) ke dalam industri hijau dan analisis rantai pasok biofuel. Rohmawati telah berkontribusi dalam artikel dan opini di media daring nasional dan internasional yang membahas isu-isu terkait energi.



Dr. Kartika Palupi Savitri adalah dosen dan peneliti di Universitas Gadjah Mada (UGM) dengan spesialisasi dalam geosains panas bumi. Ia meraih gelar magister dari Victoria University of Wellington dan gelar doktor dari University of Twente, di mana ia meneliti potensi spektroskopi citra inframerah untuk menganalisis sampel panas bumi—menjadikannya salah satu dari sedikit ahli geosains panas bumi di Indonesia dengan keahlian dalam spektroskopi inframerah. Di UGM, ia fokus pada geologi dan geokimia panas bumi dalam pengajaran dan penelitiannya, dengan minat yang semakin berkembang dalam mengintegrasikan data inframerah dari sumber lapangan, laboratorium, dan satelit dengan pendekatan pemodelan numerik untuk mendukung eksplorasi panas bumi.



Michael Suryaprawira adalah peneliti di Purnomo Yusgiantoro Center (PYC). Ia lulus dengan gelar magister dari program teknik kelautan Institut Teknologi Bandung dan kini bekerja pada beberapa proyek multi-pihak yang berkaitan dengan transisi energi Indonesia, termasuk saat ini memimpin kolaborasi antara PYC dan Climateworks Centre dalam program rantai pasok baterai rendah karbon Indonesia. Pekerjaan ia sebelumnya meliputi inisiatif dekarbonisasi jaringan listrik, penguatan kebijakan energi, dan tata kelola panas bumi. Ia berkolaborasi dan menjalin jaringan dengan pemangku kepentingan dari kementerian dan lembaga pemerintah, PLN, serta organisasi nirlaba internasional. Ia juga memimpin pengembangan dan penulisan proposal hibah sektor energi, dengan mitra termasuk Innovate UK (Inggris), Departemen Urusan Luar Negeri dan Perdagangan Australia, serta organisasi seperti Ford Foundation (Amerika Serikat) dan AVPN (*Asian Venture Philanthropy Network*).



Dr. Adi Susilo memperoleh gelar sarjana dan magister dari Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam di Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia. Dia memperoleh gelar doktor dalam bidang geofisika/geologi dari James Cook University di Townsville, Australia. Susilo saat ini menjabat sebagai profesor di Program Studi Teknik Geofisika, Departemen Fisika, Fakultas Sains di Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia. Ia merupakan anggota dan menjabat di komite eksekutif Asosiasi Geofisika Indonesia. Ia juga menjadi anggota *Indonesian Petroleum Association* (IPA) sebagai perwakilan Universitas Brawijaya. Susilo bertindak sebagai penasihat akademik untuk *European Association of Geosciences and Engineers - student chapter* Universitas Brawijaya. Minat penelitiannya meliputi energi panas bumi, mitigasi bencana, geowisata, dan minyak dan gas.



Fabby Tumiwa adalah CEO Institute for Essential Services Reform (IESR). Selama lebih dari 20 tahun, Tumiwa telah bekerja pada berbagai kebijakan dan regulasi energi. Dia memberikan nasihat kepada lembaga pemerintah Indonesia (seperti Kementerian ESDM, Kementerian Keuangan, Kementerian Perindustrian, dan Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian), organisasi nirlaba (seperti *International Energy Agency*, *World Economic Forum*, Asosiasi Energi Surya Indonesia, dan Masyarakat Energi Terbarukan Indonesia), serta organisasi pengembangan multilateral mengenai regulasi listrik, kebijakan energi terbarukan, kebijakan efisiensi energi, dan kebijakan perubahan iklim. Ia pernah menjadi perwakilan Indonesia dalam negosiasi perubahan iklim dan menjadi anggota *Climate Change Working Groups*. Ia juga terlibat dalam *Indonesia Climate Change Trust Fund Steering Committee*. Ia memberikan layanan konsultasi untuk berbagai lembaga, termasuk *German Agency for International Cooperation*, *the UK Department for International Development*, dan *the United States Agency for International Development*.



Dr. Pri Utami adalah dosen senior dalam bidang geosains panas bumi dan geofisika eksplorasi di Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada (UGM). Ia menjabat sebagai kepala Pusat Penelitian Panas Bumi di Fakultas Teknik. Minat penelitiannya meliputi geologi dan evolusi sistem panas bumi, serta interaksi fluida-batuan dalam sistem panas bumi aktif. Ia juga terlibat dalam pemberdayaan masyarakat berbasis panas bumi di Jawa Tengah dan Sulawesi Utara, serta partisipasi dalam eksplorasi dan pengembangan panas bumi di Sumatra, Jawa, Nusa Tenggara Timur, Maluku, dan Sulawesi Utara. Ia pernah menjadi dosen tamu di the *Geothermal Institute*, Universitas Auckland, dan United Nations University di Tokyo, serta menjabat sebagai wakil presiden Asosiasi Panas Bumi Internasional. Ia lulus dari UGM dengan gelar sarjana teknik geologi dan memperoleh gelar pascasarjana dari Universitas Auckland.





Dr. Raditya Wiranegara adalah manajer riset di Institute for Essential Services Reform (IESR), memimpin tim peneliti yang bekerja pada topik-topik seperti transisi energi dan *sectoral decarbonization*. Ia bergabung dengan IESR sebagai peneliti senior yang bertugas melakukan studi tentang pembangkit listrik tenaga batu bara fleksibel di Indonesia dan pendekatan lain untuk pemanfaatan kembali aset-aset yang ada. Ia juga menjadi bagian dari tim yang ditugaskan oleh IESR untuk membantu Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral dalam pengembangan jalur pensiun dini pembangkit listrik tenaga batu bara. Wiranegara memegang gelar doktor dalam bidang dirgantara dan sebelumnya bekerja dalam modelling pembakaran gas turbin utilitas beremisi rendah di Cranfield University, Inggris.



Dr. Filda Citra Yusgiantoro adalah Ketua Purnomo Yusgiantoro Center (PYC) dan dosen di Universitas Katolik Atma Jaya Indonesia, di mana ia mengajar manajemen bisnis strategis dan keberlanjutan pada tingkat sarjana dan pascasarjana. Ia memperoleh gelar doktor dalam bidang bisnis dan ekonomi dari Monash University di Australia pada tahun 2017. Sebelum itu, ia memperoleh gelar sarjana teknik kimia dari Institut Teknologi Bandung (ITB), gelar magister bisnis dan manajemen dari Università degli Studi di Padova di Italia, dan gelar magister administrasi bisnis dari Nanyang Business School di Singapura. Yusgiantoro merupakan anggota dewan direksi Climateworks Centre, sebuah organisasi nirlaba yang didirikan oleh Monash University untuk mendukung transisi menuju emisi nol bersih di Australia, Asia Tenggara, dan Pasifik. Ia juga menjadi anggota dewan penasihat untuk program teknik kimia, teknik pangan, dan teknik perminyakan di ITB, serta sering menjadi pembicara di konferensi nasional dan internasional.

Penulis Kontributor

(sesuai urutan abjad)

Nanda Mitha Angelina, Texas A&M University

Surya Darma, Indonesia Center for Renewable Energy Studies

Dewi Gentana, Geoenergis

Erick Hutrindo, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Indonesia

Ir. Khasani, Universitas Gadjah Mada

Ruly Marianti, Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH - Green Jobs for Social Inclusion and Sustainable Transformation - (GESIT) Project

Aulia Rizky Pratama, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Indonesia

Dorman Purba, PT Sarana Multi Infrastruktur

Awang Harun Satyana, Universitas Padjadjaran

Agus Praditya Tampubolon, Institute for Essential Services Reform



Editor



Jackson Grimes Grimes adalah Direktur Engagement Global di Project InnerSpace, di mana ia fokus pada pengenalan teknologi panas bumi ke negara ekonomi berkembang dan memperluas pengaruh global sektor panas bumi. Sejak memulai karirnya di Iceland School of Energy di Reykjavik University, Grimes telah fokus pada penelitian mengenai peluang pengembangan sosial yang ditawarkan teknologi panas bumi bagi komunitas terpinggirkan. Setelah kembali ke Texas, Grimes bergabung dengan Bureau of Economic Geology di University of Texas at Austin, di mana ia meneliti peluang tenaga kerja untuk sektor minyak dan gas Texas; ia menghabiskan Sidang Legislatif 2023 bersama Texas Geothermal Energy Alliance, membantu mendorong undang-undang bersejarah yang telah menempatkan negara bagian tersebut sebagai pemimpin dalam sistem panas bumi generasi baru.



Drew Nelson adalah Wakil Presiden Program dan Strategi di Project InnerSpace. Sebelum bergabung dengan InnerSpace, Nelson menjabat sebagai Kepala Program Senior di Catena Foundation, di mana ia mengawasi Program Iklim dan Energi Bersih serta mengelola portofolio hibah senilai lebih dari $30 juta. Sebelum bergabung dengan Catena, Nelson memegang posisi serupa di Cynthia and George Mitchell Foundation yang berbasis di Texas. Pada awal karirnya, Nelson menghabiskan tujuh tahun di Environmental Defense Fund (EDF), di mana ia menjabat berbagai peran, termasuk memimpin pekerjaan internasional EDF terkait metana. Ia memulai karirnya di Departemen Luar Negeri AS, di mana ia bertindak sebagai negosiator utama di Conference of the Parties.

Ucapan Terima Kasih

Laporan ini, yang diterbitkan bekerja sama dengan Institute for Essential Services Reform (IESR), tidak akan terwujud tanpa kerja keras dari sejumlah orang di seluruh Indonesia dan negara-negara lain. Banyak penulis yang berkontribusi dalam penyusunan laporan ini. Kami ingin mengucapkan terima kasih kepada mereka semua. Kami juga menghargai masukan dan kontribusi para ahli yang meninjau draf laporan ini—serta mereka yang memberikan inspirasi dan bimbingan.

Pendanaan untuk karya ini disediakan oleh Project InnerSpace. Jackson Grimes dari Project InnerSpace bertindak sebagai manajer proyek untuk laporan ini, dengan dukungan dari Bapak Reananda Hidayat dari Institute for Essential Services Reform. Wendy Rubin bertindak sebagai editor naskah yang teliti.

Laporan ini mencerminkan pandangan para penulis individu, namun tidak secara spesifik mencerminkan pandangan reviewer, pemberi dana, pendukung, atau kolaborator tertentu. Baik staf Project InnerSpace maupun pemberi dana, pendukung, atau kolaborator tidak memberikan jaminan atau pernyataan, baik secara eksplisit maupun implisit, terkait isi karya ini (termasuk kelengkapan atau keakuratannya) dan tidak akan bertanggung jawab atas penggunaan pada laporan ini.

Komentar dan pertanyaan dapat ditujukan ke:

Jackson Grimes
Director of Global Engagement
Project InnerSpace
68 Harrison Ave., Suite 605
PMB 99590
Boston, Massachusetts 02111-1929 US

Email: reports@projectinnerspace.org

Informasi lebih lanjut tentang Project InnerSpace tersedia di www.projectinnerspace.org.



Daftar Gambar

Gambar ES.1 Total Heat-in-Place Panas Bumi Indonesia dengan Kawasan Lindung 24
Gambar ES.2 Fasilitas Tenaga Batu Bara yang Tumpang Tindih dengan Sumber Daya Panas Bumi 25
Gambar ES.3 Jaringan Listrik Indonesia Hingga Saat Ini 26
Gambar ES.4 Rekomendasi Kebijakan Panas Bumi untuk Indonesia 28
Gambar ES.5 Peta Sumber Daya Panas Bumi Indonesia 29
Gambar ES.6 Permintaan Themal untuk Pemanasan Industri dan Manufaktur Tahun 2023 Versus Tahun 2050 31
Gambar ES.7 Keterampilan yang Dapat Dialihkan dari Industri Minyak dan Gas 32
Gambar ES.8 Potensi Transisi Pekerjaan dari Minyak dan Gas ke Panas Bumi 33
Gambar 1.1 Suhu Bagian Dalam Bumi 38
Gambar 1.2 Membandingkan Jejak Permukaan 38
Gambar 1.3 Perbandingan Faktor Kapasitas 39
Gambar 1.4 Pemanfaatan Panas Bumi dan Spesifikasi Suhu 40
Gambar 1.5 Jenis-jenis Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi 41
Gambar 1.6 Jaringan Pendinginan dan Pemanasan Panas Bumi 42
Gambar 1.7 Suhu Proses Industri dan Teknologi Pompa Panas 43
Gambar 1.8 Pendinginan dan Pemanasan dengan Pompa Panas Sumber Tanah 44
Gambar 1.9 Pendingin Absorpsi 45
Gambar 1.10 Keterampilan yang Dapat Dialihkan dari Industri Minyak dan Gas 46
Gambar 1.11 Kelimpahan Energi Panas Bumi 47
Gambar 1.12 Jenis-jenis Sistem Energi Panas Bumi 48
Gambar 1.13 Geografi, Aplikasi, dan Teknologi yang Ada dan Baru 50
Gambar 2.1 Bauran Energi Antara 2023 dan 2024 Berdasarkan Sektor 57
Gambar 2.2 Target Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) per Sektor vs Realisasi Bauran Energi 58
Gambar 2.3 Target Emisi Kebijakan Energi Nasional 2025 60
Gambar 2.4 Target VS Realisasi Bauran Energi Terbarukan Indonesia, 2015–2024 60
Gambar 2.5 Perkembangan Proyek Energi Terbarukan pada 2023 and 2024 Berdasarkan Sumber 61
Gambar 2.6 Konsumsi Energi Menurut Sektor, 2013–2024 62
Gambar 2.7 Pertumbuhan Konsumsi di Sektor Industri, 2020–2024 63
Gambar 2.8 Konsumsi Batu Bara per Industri, 2021–2024 64
Gambar 2.9 Jaringan Kelistrikan Indonesia 65
Gambar 2.10 Biaya Proyek Panas Bumi di Indonesia, 2016-2019 67
Gambar 2.11 Estimasi LCOE Pembangkit Listrik Panas Bumi, 2017-2024 69
Gambar 2.12 Fasilitas Batu Bara yang Berada di Atas Sumber Daya Panas Bumi 70
Gambar 2.13 Investasi dan Proyek Minyak dan Gas, 2003-2023 71
Gambar 2.14 Sumber Produksi dan Rig Aktif, 2016-2025 72
Gambar 2.15 Tarif Perjanjian Jual Beli Listrik (PPA) Panas Bumi di Bawah Skema Offtake PLN 74
Gambar 3.1 Linimasa Pengembangan Panas Bumi Indonesia 83
Gambar 3.2 Kapasitas Terpasang Global (MWe): 10 Besar Negara Penghasil Listrik Panas Bumi 84
Gambar 3.3 Peta Geologi Indonesia 85
Gambar 3.4 Jenis-jenis Sumber Daya Panas Bumi di Indonesia 87
Gambar 3.5 Indikator Potensi Panas Bumi di Indonesia 88
Gambar 3.6 Distribusi Gunung Api Bawah Laut dan Ventilasi Hidrotermal 89



Gambar 3.7 Cekungan Kaldera Tondano 91
Gambar 3.8 Fitur Geologi yang Relevan terhadap Potensi Panas Bumi Radiogenik di Indonesia 92
Gambar 3.9 Pantai Batu Ketak, Pulau Bangka 93
Gambar 3.10 Cekungan Sedimen dan Fitur Panas Bumi 94
Gambar 3.11 Gradien Geotermal pada Sumur Minyak 95
Gambar 3.12 Fitur Geologi yang Relevan Terhadap Potensi Panas Bumi Berasosiasi Batuan Metamorf di Indonesia 98
Gambar 3.13 Jaminan Sumber Daya Panas Bumi – Diagram McKelvey 100
Gambar 3.14 Total Panas Bumi Indonesia (Heat-in-Place), Termasuk Kawasan Lindung 103
Gambar 3.15 Peta Sumber Daya Panas Bumi Indonesia 104
Gambar 4.1 Pemanfaatan Sumber Daya Panas Bumi 120
Gambar 4.2 Aplikasi dan Kebutuhan Temperatur Panas Bumi 121
Gambar 4.3 Proyeksi Pertumbuhan Global Pemanfaatan Langsung Panas Bumi 122
Gambar 4.4 Pemanfaatan Langsung Panas Bumi di Indonesia 123
Gambar 4.5 Konsumsi Energi Final Berdasarkan Jenis 124
Gambar 4.6 Konsumsi Energi Final Berdasarkan Sektor 125
Gambar 4.7 Konsumsi Energi pada Sektor Industri 126
Gambar 4.8 Konsumsi Energi pada Sektor Residensial 126
Gambar 4.9 Konsumsi Energi pada Sektor Komersial 127
Gambar 4.10 Rincian Penggunaan Energi di Sektor Komersial 127
Gambar 4.11 Proyek Pompa Panas Bumi Skala Komersial di Swiss 128
Gambar 4.12 Sektor dengan Kebutuhan Energi Panas Tertinggi 129
Gambar 4.13 Kebutuhan Energi Panas yang Dapat Digantikan 130
Gambar 4.14 Total Kebutuhan Energi Panas dan Analisis Ketergantian 131
Gambar 4.15 Perbandingan 2023 dan 2050: Kebutuhan Energi Termal untuk Proses Pemanasan Industri dan Manufaktur 132
Gambar 4.16 Proyeksi Kebutuhan Pendinginan dan Penyimpanan Dingin 133
Gambar 4.17 Proyeksi Kebutuhan Energi Pendinginan Berdasarkan Jenis Peralatan 133
Gambar 4.18 Proyeksi Kebutuhan Energi Terman Penyimpanan Dingin Berdasarkan Jenis Peralatan 134
Gambar 4.19 Total Kebutuhan Energi Panas untuk HVAC Sektor Residensial dan Komersial, 2023–2050 134
Gambar 4.20 Total Kebutuhan Energi Termal untuk HVAC Residensial Berdasarkan Jenis Peralatan, 2023–2050 135
Gambar 4.21 Total Kebutuhan Energi Termal untuk HVAC Komersial Berdasarkan Jenis Peralatan, 2023–2050 136
Gambar 4.22 Proyeksi Total dan Kebutuhan Energi Termal yang Dapat Digantikan Berdasarkan Sektor Penggunaan Akhir, 2023–2050 136
Gambar 4.23 Preferensi Peta Data Center 137
Gambar 4.24 Lapisan Reservoir Pendingin Panas Bumi 137
Gambar 4.25 Temperatur pada Kedalaman 100 Meter 140
Gambar 4.26 Temperatur pada Kedalaman 500 Meter 140
Gambar 4.27 Temperatur pada Kedalaman 1,000 Meter 140
Gambar 4.28 Distribusi Temperatur Tanah Dangkal 141
Gambar 4.29 Kebutuhan Pendinginan pada Sektor Rumah Tangga per Provinsi di Indonesia 141
Gambar 4.30 Peta Kesesuaian Kebutuhan HVAC Residensial, 2023 142
Gambar 4.31 Kebutuhan Energi Panas Dasar untuk HVAC Komersial, per Provinsi di Indonesia 143
Gambar 4.32 Peta Kesesuaian untuk Pendinginan Komersial 144



Gambar 4.33 Jaringan Pendinginan dan Pemanasan Panas Bumi 145
Gambar 4.34 Kota yang Paling Sesuai untuk District Cooling. 146
Gambar 4.35 Pemanfaatan Uap Panas Bumi Berlebih untuk Pertanian 147
Gambar 4.36 Alur dan Proses untuk Pengeringan Kopi dengan Pemanfaatan Langsung 148
Gambar 4.37 Kesesuaian Pemanasan Proses Pertanian dan Produk Susu di Seluruh Indonesia 149
Gambar 4.38 Peluang Terbaik Pemanasan Proses di Sektor Pertanian 150
Gambar 4.39 Peta Jalan Implementasi Bertahap 151
Gambar 4.40 Perbandingan Tiga Lokasi Pendinginan Panas Bumi Prioritas Tinggi 152
Gambar 4.41 Cara Menghitung Kebutuhan Energi Panas yang Secara Teknis Dapat Digantikan oleh Panas Bumi. 155
Gambar 4.42 Teknologi Berbasis Panas Bumi untuk Menggantikan Kebutuhan Energi Panas 156
Gambar 4.43 Data dan Asumsi Pemanasan Proses Industri dan Manufaktur 157
Gambar 4.44 Proyeksi Paramater Pemanasan Proses Tahun 2050 160
Gambar 5.1 Keterampilan yang Dapat Dialihkan dari Industri Minyak dan Gas 171
Gambar 5.2 Potensi Transisi Pekerjaan dari Migas ke Panas Bumi 172
Gambar 5.3 Responden Survei Mahasiswa. 174
Gambar 5.4 Alur Kerja Kementerian/Lembaga yang Terlibat dalam Pengembangan Tenaga Kerja di Sektor Energi 174
Gambar 5.5 Standar Kompetensi Kerja Eksisting yang Terkait dengan Panas Bumi 175
Gambar 5.6 Perusahaan Panas Bumi Indonesia dan Afiliasinya dengan Minyak dan Gas Bumi 177
Gambar 5.7 Kepemilikan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi di Indonesia. 178
Gambar 5.8 Program Terkait Panas Bumi di Lembaga Pendidikan Tinggi di Indonesia 180
Gambar 5.9 Kesenjangan Antara Pasokan Lulusan Panas Bumi dan Permintaan Industri 181
Gambar 5.10 Hambatan Pengembangan Tenaga Kerja Panas Bumi dari Sektor Minyak dan Gas 182
Gambar 5.11 Peringkat Lulusan Baru yang Diminati Sektor Industri 183
Gambar 5.12 Pemetaan Rekomendasi untuk Masing-masing Hambatan 184
Gambar 6.1 Persyaratan Tingkat Komponen Lokal untuk Pembangkit Listrik Panas Bumi di Indonesia .. 193
Gambar 6.2 Membedakan Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) 194
Gambar 6.3 Penerimaan Negara Bukan Pajak (PNBP) Panas Bumi 195
Gambar 6.4 Dana Bagi Hasil Panas Bumi Tingkat Provinsi Tahun 2024 197
Gambar 6.5 Isu-isu Masyarakat Terkait dengan Proyek Listrik Panas Bumi di Indonesia 199
Gambar 6.6 Tantangan Sosial yang Terorganisasi Berdasarkan Tahap Proyek Panas Bumi 200
Gambar 6.7 Lokasi Wilayah Adat di Indonesia yang Bertampalan dengan Potensi Panas Bumi. 203
Gambar 6.8 Interaksi Kementerian dan Lembaga di Indonesia Terkait Energi Panas Bumi 206
Gambar 7.1 Ringkasan Skema Pengembangan Panas Bumi dan Entitas Pelaksana Utama di Indonesia 218
Gambar 7.2 Proyeksi Permintaan Listrik untuk Pendinginan di Indonesia 227
Gambar 7.3 Diagram Proses Penerbitan Sertifikat Kelayakan Operasional Pemanfaatan Langsung Panas Bumi. 229
Gambar 7.4 Tata Kelola Sektor Panas Bumi di Empat Negara 230
Gambar 7.5 Risiko, Biaya, dan Sumber Pendanaan Selama Ini Untuk Proyek Panas Bumi. 233
Gambar 8.1 Cincin Api Pasifik 244
Gambar 8.2 Ilustrasi Banjir Bandang di Area Panas Bumi 245
Gambar 8.3 Membandingkan Jejak Permukaan 246
Gambar 8.4 Lokasi dan Kapasitas Panas Bumi Konvensional di Indonesia Berdasarkan Status Penggunaan Lahan 247



Gambar 8.5	Jenis-jenis Sistem Energi Panas Bumi	248
Gambar 8.6	Proyek Pompa Panas Geotermal Skala Komersial di Swiss	248
Gambar 8.7	Emisi GRK Global Berdasarkan Sumber Listrik	249
Gambar 8.8	Total Panas Bumi Indonesia (Heat-in-Place), Termasuk Kawasan Lindung	251
Gambar 8.9	Komposisi Gas Tidak Berkondensasi (NCG) Dan Batas Ambang Bahaya Pada Ekosistem Panas Bumi	252
Gambar 8.10	Tingkat Kebisingan Berbagai Fase Pengembangan Panas Bumi Dibandingkan Sumber Suara Lain	255
Gambar 8.11	Emisi GRK Proyek Panas Bumi di Indonesia	256
Gambar 8.12	Sumber dan Jenis Limbah Padat Dari Lapangan Panas Bumi	257



Daftar Istilah

***Advanced geothermal system*/AGS (Sistem Panas Bumi Lanjutan):** Kadang disebut sebagai sistem panas bumi sirkuit tertutup, merupakan teknologi panas bumi (dengan berbagai konfigurasi) yang memungkinkan sirkulasi fluida di bawah permukaan tanpa fluida meninggalkan sumur. Fluida dipompa dari permukaan, menyerap panas dari formasi sekitarnya (utama melalui konduksi), dan mengalir kembali ke permukaan, di mana panas tersebut dimanfaatkan untuk pemanfaatan langsung atau produksi listrik. AGS dapat diterapkan pada berbagai jenis batuan, dapat menggunakan fluida rekayasa seperti karbon dioksida superkritis (sCO_2) untuk meningkatkan efisiensi, dan dianggap dapat dibuat skala besar.

***Brittle-ductile transition zone* (Zona transisi Rapuh-Ulet):** Zona pada kerak Bumi sebagai area transisi dari kerak atas yang lebih rapuh (retak) ke kerak bawah yang lebih lentur (bergerak secara plastis).

***Caldera* (Kaldera):** Sebuah depresi vulkanik besar, umumnya berbentuk lingkaran, dengan diameter yang jauh lebih besar daripada kawah. Sebuah kaldera terbentuk ketika ruang magma gunung berapi menjadi kosong karena letusan, sehingga menyebabkan tanah di atasnya runtuh.

***Conventional geothermal* (Panas bumi konvensional):** Metode ekstraksi panas bumi yang memerlukan sistem hidrotermal dan tidak menggunakan fraktur hidraulik untuk mengolah reservoir bawah permukaan. Pengeboran horizontal dapat digunakan, tetapi hanya untuk meningkatkan akses ke reservoir yang secara alami terbentuk dan fluida yang secara alami terdapat di dalamnya.

***Conventional hydrothermal system* / CHS (Sistem hidrotermal konvensional):** Juga dikenal sebagai sistem panas bumi tradisional atau sistem panas bumi hidrotermal. Sumber daya panas bumi ini seringkali dapat diakses dekat permukaan dan terkadang memiliki manifestasi permukaan, seperti mata air panas, formasi batuan vulkanik, geyser, atau lubang uap. Sebuah CHS memiliki kombinasi permeabilitas yang cukup di bawah permukaan, transfer panas yang cukup ke dalam sistem, dan keberadaan air yang mengalir secara alami, sehingga menghasilkan sumber daya panas bumi yang dapat dimanfaatkan. Aliran panas didominasi oleh konveksi (yaitu, konduksi dan adveksi berkontribusi pada pergerakan panas). Sebagian besar kapasitas panas bumi yang telah dikembangkan di dunia saat ini dihasilkan dari sumber daya CHS.

***Direct-use geothermal system* (Sistem pemanfaatan langsung panas bumi):** Alih-alih menggunakan panas geotermal untuk menghasilkan listrik, sistem ini memanfaatkan panas yang terkandung dalam fluida geotermal untuk berbagai aplikasi pemanasan dan pendinginan. Sistem pemanfaatan langsung ini dapat berskala dangkal atau dalam.

- Aplikasi pemanfaatan langsung skala dangkal umumnya menggunakan pompa panas sumber tanah untuk memanfaatkan suhu konstan lapisan bawah tanah yang dangkal untuk berbagai aplikasi suhu rendah, termasuk pemanasan dan pendinginan bangunan.
- Pada pemanfaatan langsung skala dalam, penggalian sumur mencapai suhu lapisan bawah tanah yang lebih tinggi yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk pemanasan langsung industri dan komersial atau berbagai proses industri dan manufaktur. Aplikasi pemanfaatan langsung skala dalam masih dapat menggunakan pompa panas, tetapi pada suhu yang jauh lebih tinggi. Sumur geotermal dapat menargetkan akuifer dalam atau tempat buatan manusia yang berisi air, seperti area tambang.



***Engineered/enhanced geothermal system*/EGS (Sistem Panas Bumi Rekayasa):** Teknologi geotermal yang menggunakan fraktur hidraulik untuk merancang reservoir bawah permukaan dengan menciptakan atau memperkuat retakan yang sudah ada dalam batuan. Fluida kemudian dialirkan melalui jaringan retakan tersebut, di mana fluida memanas dan kemudian dibawa ke permukaan untuk menghasilkan listrik atau untuk pemanfaatan langsung. Sistem ini dapat diterapkan pada berbagai jenis batuan dan diperkirakan bisa dibuat skala besar.

- ***Traditional engineered geothermal system* (Tradisional EGS):** Sistem yang menggunakan fracturing hidraulik untuk merancang atau meningkatkan kualitas reservoir bawah permukaan guna menghasilkan panas atau listrik geotermal, namun tidak menggunakan teknik pengeboran *directional drilling* atau *multi-stage fracturing*. Sistem ini umumnya dikembangkan dengan mengebor sumur vertikal atau sumur menyimpang dan dapat diterapkan pada berbagai jenis batuan, namun pengembangan sistem ini secara historis berfokus pada formasi batuan dasar.
- ***Next-generation engineered geothermal system* (EGS generasi baru):** Tidak sama dengan konsep umum "geotermal generasi baru". Ini merupakan tipe EGS yang masih menggunakan *fracturing* hidraulik untuk merancang atau meningkatkan kualitas reservoir bawah tanah, sembari mengintegrasikan teknik pengeboran dan/atau *fracking* canggih, termasuk tetapi tidak terbatas pada pengeboran horizontal dan *multi-stage fracturing*. Sistem ini dapat diterapkan pada berbagai jenis batuan.

***Geophysics* (Geofisika):** Studi tentang sifat dan proses fisik Bumi, menggabungkan pengetahuan geologi, fisika, matematika, dan berbagai ilmu lain. Dalam eksplorasi panas bumi, metode geofisika digunakan untuk memetakan lapisan bawah permukaan bumi, termasuk distribusi jenis batuan, struktur geologi, suhu, medan magnetik dan gravitasi, keberadaan air tanah, dan fitur-fitur lain.

***Geothermal gradient* (Gradien panas bumi):** Laju peningkatan suhu seiring dengan kedalaman Bumi.

***Geothermal system* (Sistem panas bumi):** Sistem yang melibatkan transfer panas dari bagian dalam bumi ke permukaan.

***Granite* (Granit):** Batuan beku intrusif berbutir kasar dan berwarna terang yang utamanya terdiri dari mineral kuarsa, feldspar, dan mika. Batu ini sering mengandung unsur radioaktif dalam konsentrasi relatif tinggi, seperti uranium, thorium, dan kalium, yang menghasilkan panas radiogenik saat mengalami peluruhan, sehingga berkontribusi pada panas di bagian dalam bumi.

***Ground source* (Geothermal) *heat pump* / GSHP (Pompa panas sumber tanah):** Pompa yang mengumpulkan suhu lingkungan pada lapisan bawah permukaan tanah dengan kedalaman 1 hingga 2 meter, di mana suhu tanah relatif konstan pada 13°C. GSHP (*Ground Source Heat Pump*) secara tradisional digunakan untuk pemanasan dan pendinginan bangunan, namun pompa ini semakin banyak digunakan dalam aplikasi industri dan komersial dengan suhu yang lebih tinggi.

***Hydrothermal* (Hidrotermal):** Sistem yang berkaitan dengan air panas, terutama dalam proses yang melibatkan fluida panas di dalam sistem panas bumi.

***Magma* (Magma):** Bahan alami meleleh atau setengah meleleh yang terletak di bawah atau di dalam kerak bumi, serta membentuk batuan beku saat mendingin dan mengeras. Suhu magma umumnya berkisar antara 700°C hingga 1.300°C, tetapi dapat melebihi 1.800°C.

***Manifestation* (Manifestasi):** Fitur permukaan tempat fluida panas bumi dilepaskan (misalnya, mata air panas, danau/kolam panas, fumarol) dan fitur yang terbentuk akibat interaksi fluida panas dengan batuan serta endapan mineral hidrotermal di permukaan tanah.



***Mohorovičić (Moho) discontinuity* (Diskontinuitas Moho):** Batas antara kerak bumi dan mantel di bawahnya. Batas ini umumnya ditemukan pada kedalaman antara 5-10 kilometer di bawah dasar laut dan antara 30-40 kilometer di bawah daratan.

***Next-generation geothermal* (Panas bumi generasi baru):** Istilah umum untuk teknologi ekstraksi panas bumi apa pun yang memanfaatkan energi bawah permukaan di luar wilayah geografis sistem hidrotermal konvensional. Dalam kebanyakan kasus, teknologi panas bumi generasi baru mengandalkan kemajuan dari industri minyak dan gas serta memperluas potensi geografis panas bumi.

***Pluton* (Plutonik):** Batuan beku bermassa besar yang terbentuk di bawah permukaan bumi melalui proses pendinginan dan pengendapan magma secara perlahan.

***Radiogenic* (Radiogenik):** Berkaitan dengan radioaktivitas. Panas radiogenik adalah energi panas yang dilepaskan oleh peluruhan radioaktif unsur-unsur di kerak dan mantel bumi, yang berkontribusi pada panas geotermal.

***Rock types* (Tipe batuan)**

- ***Igneous rock* (Batuan beku):** Batuan yang terbentuk dari pendinginan dan pengendapan material batuan cair (magma) yang dihasilkan di dalam bumi.
- ***Sedimentary rock* (Batuan sedimen):** Batuan yang terbentuk dari akumulasi dan pengikatan sedimen, yang dapat mencakup fragmen batuan lain, mineral, atau material biologis. Batuan ini umumnya terbentuk di cekungan sedimen dan dipanaskan oleh panas konduktif dari dalam bumi serta panas radiogenik dari unsur-unsur yang mengalami peluruhan.
- ***Metamorphic rock* (Batuan metamorf):** Batuan yang terbentuk ketika batu yang sudah ada (batuan beku, sedimen, atau metamorf) secara bertahap diubah oleh panas dan tekanan tanpa meleleh. Perubahan ini mengubah mineralogi dan tekstur batuan dan dapat menghasilkan panas sisa yang dapat diekstraksi.

***Sedimentary geothermal system* (Sistem panas bumi sedimen):** Jenis sumber daya panas bumi didominasi oleh konduksi yang ditemukan dalam formasi batuan sedimen (dengan beberapa sel konveksi dalam lingkungan yang kompleks). Batuan sedimen ini—termasuk batupasir, batulempung, dan batu kapur—seringkali mengandung air di pori-porinya yang dapat dimanfaatkan untuk produksi energi panas bumi. Sebagian besar cekungan sedimen merupakan sistem tertutup, kecuali jika telah mengalami pengangkatan, dalam hal ini mata air permukaan dapat menandakan potensi panas bumi.

***Supercritical* (Superkritis):** Mengacu pada keadaan di atas suhu dan tekanan kritis di mana suatu zat menjadi fluida superkritis. Fluida semacam ini memiliki sifat-sifat gas dan cairan, sehingga sangat efisien untuk ekstraksi panas dalam sistem panas bumi.

***Superhot rock* / SHR (Batuan yang sangat panas):** Istilah yang digunakan untuk teknologi panas bumi yang bertujuan untuk memanfaatkan sumber daya batuan panas di atas sekitar 373°C atau titik superkritis air. Di daerah vulkanik, SHR dapat ditemukan relatif dekat dengan permukaan; di daerah lain, SHR mungkin butuh pengeboran hingga kedalaman 10 kilometer atau lebih, sehingga SHR kadang-kadang disebut sebagai sistem panas bumi dalam.

***Tectonic plates* (Lempeng tektonik):** Lempeng-lempeng besar dari litosfer bumi (kerak dan mantel atas) yang bergerak perlahan di permukaan bumi. Ada dua jenis utama lempeng tektonik: lempeng samudra dan lempeng benua. Pergerakan mereka mendorong banyak proses geologi, termasuk gempa bumi, vulkanisme, dan pembentukan pegunungan.



Daftar Singkatan

Daftar ini mendefinisikan singkatan-singkatan yang sering digunakan dalam laporan. Banyak dari singkatan-singkatan tersebut didasarkan pada istilah dalam Bahasa Indonesia.

AGS: sistem panas bumi lanjutan

AHP: Proses Hierarki Analitis

AI: kecerdasan buatan

AMDAL: Analisis mengenai Dampak Lingkungan

ASHP: pompa panas sumber udara

Bappenas: Badan Perencanaan Pembangunan Nasional

BPKM: Badan Koordinasi Penanaman Modal / Kementerian Investasi dan Hilirisasi

BOO: Bangun-miliki-kelola

BOOT: Bangun-miliki-kelola-serahkan

bpj: bagian per juta

BPPB: bonus produksi panas bumi

BRIN: Badan Riset dan Inovasi Nasional

CAPEX: belanja modal

CO_2: karbon dioksida

COD: tanggal operasi komersial

COP: koefisien kinerja

CR: rasio konsistensi

CSR: tanggung jawab sosial perusahaan

°C: Celsius

dBA: desibel terbobot A

DBH: Dana Bagi Hasil

EGS: sistem panas bumi rekayasa

ESDM: Energi dan Sumber Daya Mineral

EWTTF: satuan tugas tenaga kerja transisi energi

FORGE: Observatorium Frontier untuk Penelitian Eksplorasi Geotermal

FPIC: protokol persetujuan bebas, sebelumnya, dan berdasarkan informasi

GES: penyimpanan energi panas bumi

GRK: gas rumah kaca

GREM: Proyek Mitigasi Risiko Sumber Daya Panas Bumi

GSHP: pompa air sumber panas

GW: gigawatt

GWh: gigawatt-jam

HDR: Batu Panas Kering

HiP: *heat-in-place*

HSA: Akuifer sedimen panas

HSAs and CSAs: perjanjian pasokan panas dan pendingin

HVAC: pemanasan, ventilasi, dan pendingin udara

IBSAP: Strategi dan Rencana Aksi Keanekaragaman Hayati Indonesia

IEA: International Energy Agency



IESR: Institute for Essential Services Reform

IPB: Izin Panas Bumi

ITB: Institut Teknologi Bandung

I-NCAP: Rencana Aksi Pendinginan Nasional Indonesia

KBLI: Klasifikasi Baku Lapangan Usaha Indonesia

Kemenhut: Kementerian Kehutanan

Kemnaker: Kementerian Ketenagakerjaan

KLH: Kementerian Lingkungan Hidup

KPBU: Kemitraan Pemerintah dan Badan Usaha

LCOE: biaya listrik rata-rata

LPG: gas minyak cair atau Elpiji

MHGR: sumber daya geotermal berasosiasi batuan metamorf

MHGS: sistem geotermal berasosiasi batuan metamorf

$MtCO_2e$: juta ton setara karbon dioksida

MTOE: juta ton setara minyak

MW: megawatt

MWh: megawatt-jam

NDC: Komitmen yang ditetapkan secara nasional

NCG: gas tidak terkondensasi

O&G : minyak dan gas bumi

O&M: operasional dan perawatan

OSS: sistem perizinan berusaha terintegrasi secara elektronik

PGE: PT Pertamina Geothermal Energy

PJ/km^2: petajoule per kilometer persegi

PLN: Perusahaan Listrik Negara

PNBP: Penerimaan Negara Bukan Pajak

PJBTL: Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik

PPN: Pajak Pertambahan Nilai

PT: Perseroan Terbatas

PT SMI: PT Sarana Multi Infrastruktur

PYC: Purnomo Yusgiantoro Center

RUKN: Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional

RUPTL: Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik

SHGR: sumber daya geotermal berasosiasi batuan sedimen

SHR: batuan super panas

SKK Migas: Satuan Kerja Khusus Pelaksana Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi

SKKNI: Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia

SLO: Sertifikat Laik Operasi

SWIFT: peta jalan nasional pengembangan sumber daya manusia untuk mendukung transisi energi Indonesia

TEN: jaringan energi termal

TJ: terajoule

TKT: Tingkat Kesiapan Teknologi

TWh: terrawatt-jam

VOC: senyawa organik mudah menguap

WKP: Wilayah Kerja Panas Bumi

ZEE: Zona Ekonomi Eksklusif





Ringkasan Eksekutif

Membuka kunci Potensi Geotermal Indonesia

Project InnerSpace

Dengan memperluas tenaga panas bumi konvensional ke sistem generasi berikutnya, pemanasan industri, dan district cooling, Indonesia dapat menjadi pemimpin energi bersih global, meningkatkan kualitas hidup, mendorong transisi energi yang lebih adil, mengurangi impor bahan bakar, dan menurunkan emisi.

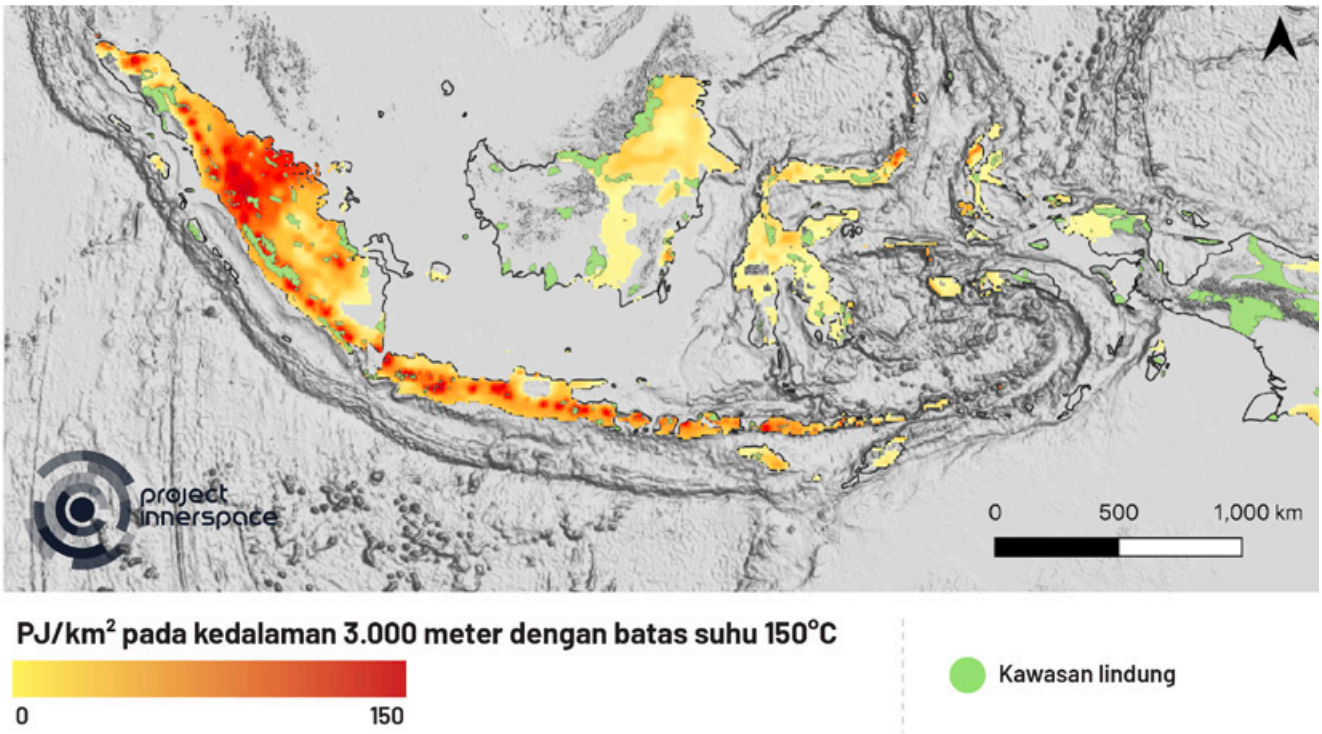
Indonesia, yang membentang dari Sumatra hingga Papua, mencakup ribuan pulau, hutan hujan yang lebat, gunung berapi yang tinggi, lembah yang subur, dan kota besar yang padat penduduknya. Masyarakat dan lanskapnya sama beragamnya dengan geologinya. Terletak di sepanjang Cincin Api Pasifik, Indonesia memiliki busur vulkanik aktif, sistem magma muda, dan cekungan sedimen besar yang memusatkan panas Bumi di bawah permukaan tanahnya. Semua fitur ini menunjukkan bahwa Indonesia memiliki salah satu anugerah sumber daya panas bumi terkaya di dunia. Panas naik di bawah lapangan hidrotermal *dan* melintasi wilayah yang luas tanpa cairan alami. Keanekaragaman geologi tersebut mendukung berbagai solusi panas bumi.

Proyek hidrotermal konvensional tetap menjadi fondasi penting bagi tenaga listrik yang solid dan bersih di seluruh Indonesia. (Lihat Bab 1, "*Geothermal 101: Overview of Technologies and Applications.*") Akan tetapi, Indonesia memiliki peluang panas bumi yang lebih besar—*jauh* lebih besar. Dengan pengeboran yang canggih dan konstruksi sumur yang modern, sistem generasi berikutnya dapat mengakses panas dalam formasi berpermeabilitas rendah dan memberikan panas untuk pemanfaatan langsung bagi industri. Sistem ini juga dapat memberikan pendinginan yang andal untuk kampus dan gedung. Perluasan fokus nasional di luar reservoir konvensional akan sangat meningkatkan potensi panas bumi praktis Indonesia.

Rencana energi dan iklim Indonesia menunjukkan bahwa fokus ini perlu diperluas. Untuk mencapai target nasional, energi terbarukan harus mencapai antara 19% dan 23% dari bauran energi pada tahun 2030 dan sekitar 70% pada tahun 2060. Akan tetapi, Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) dan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN hanya



TOTAL *HEAT-IN-PLACE* PANAS BUMI INDONESIA DENGAN KAWASAN LINDUNG



Gambar ES.1: Peta tersebut menyajikan perkiraan heat-in-place (HiP) yang dinyatakan dalam petajoule per kilometer persegi (PJ/km^2) untuk interval setebal 3.000 meter antara kedalaman 0 meter dan 3.000 meter, dengan menerapkan batas suhu bawah permukaan tanah minimum sebesar 150°C. Area berwarna hijau merupakan kawasan lindung nasional. Sumber: Project InnerSpace. (2025). UNEP-WCMC dan IUCN (2025), Protected Planet: [World Database on Protected Areas (WDPA)] [Daring], [Oktober/2025], Cambridge, Inggris Raya: UNEP-WCMC dan IUCN. Tersedia di: www.protectedplanet.net

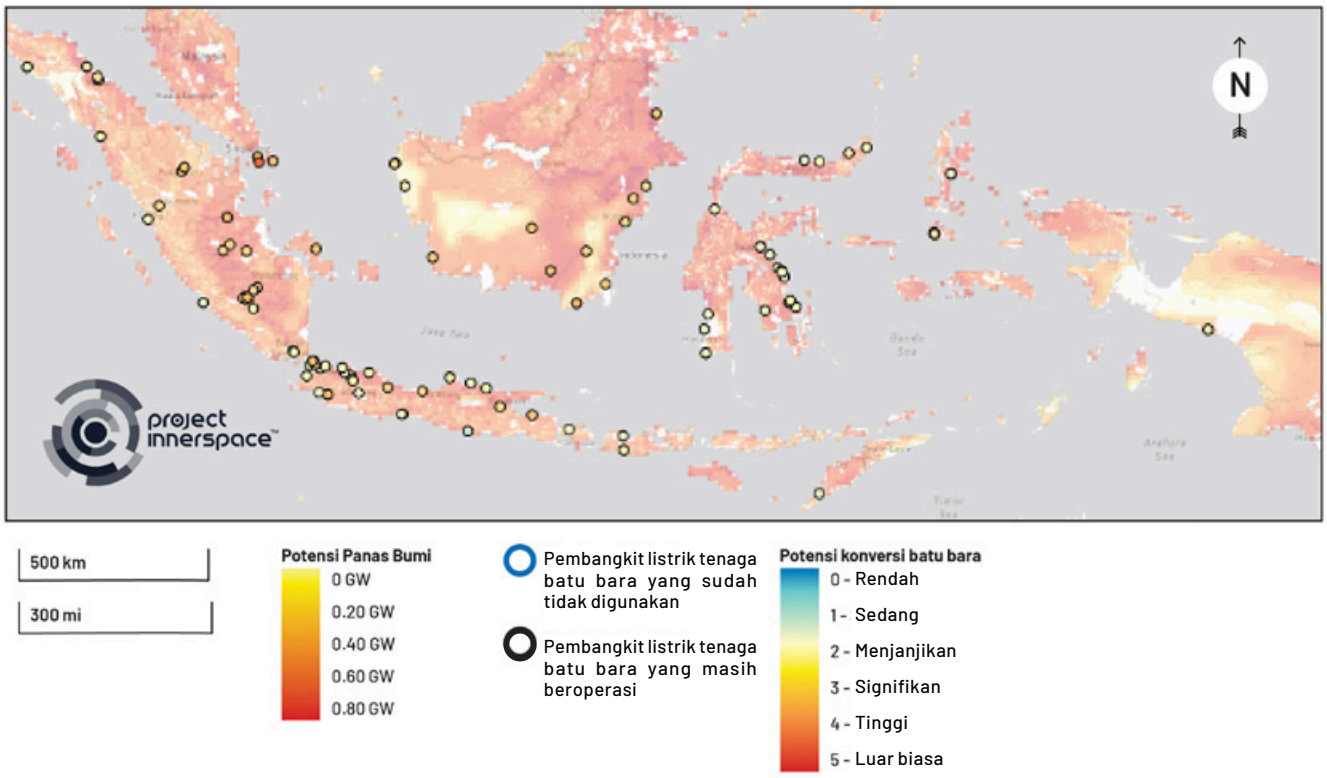
mencakup antara 21 gigawatt dan 23 gigawatt kapasitas panas bumi pada tahun 2060—sekitar 5% dari kapasitas listrik yang diproyeksikan.[1,2] Memanfaatkan sepenuhnya sumber daya Indonesia akan memperlancar jalan bagi Indonesia dalam mencapai status nol bersih.

Mengingat Indonesia memiliki sejarah panas bumi yang panjang, landasan regulasi yang kuat telah memberikan panduan pengembangan listrik panas bumi, tetapi harus berkembang untuk mencerminkan kemampuan multisektoral panas bumi. Instrumen saat ini—seperti Undang-Undang Energi, Undang-Undang Ketenagalistrikan, Kebijakan Energi Nasional, RUKN, dan RUPTL—masih memperlakukan panas bumi terutama sebagai sumber daya listrik. Pengakuan panas bumi sebagai aset pembangkitan tenaga, panas, dan pendinginan dapat memberikan dasar pengembangan proyek yang lebih jelas dan lebih dapat diprediksi kepada para investor dan pengembang.

Analisis pada Bab 3 laporan ini memperkirakan bahwa Indonesia memiliki potensi teknis panas bumi sebesar 2.160 gigawatt—21 kali lipat dari kapasitas terpasang saat ini dan jauh lebih besar dari perkiraan saat ini sebesar 27 gigawatt sumber daya hidrotermal (lihat **Gambar ES.1**). Badan Energi Internasional (*International Energy Agency*/IEA) juga memperkirakan bahwa Indonesia memiliki sekitar 60 terawatt energi termal yang cocok untuk pemanasan dan pendinginan industri.[3] Pada tahun 2050, panas bumi dapat memenuhi hampir 90% dari permintaan pemanasan industri Indonesia di sektor manufaktur utama. (Lihat Bab 4, *"Beyond Electricity: Indonesia's Thermal Energy Demand and Direct Use Potential."*) Dalam laporan terbarunya, *The Future of Geothermal*, IEA mencatat bahwa di Asia Tenggara, "panas bumi generasi berikutnya bisa menjadi pilihan domestik yang terjangkau untuk mengurangi ketergantungan saat ini pada pembangkit listrik tenaga batu bara sekaligus menjamin ketahanan energi yang berkelanjutan."[4] Praktisnya, ini berarti Indonesia dapat menggabungkan



FASILITAS TENAGA BATU BARA YANG TUMPANG TINDIH DENGAN SUMBER DAYA PANAS BUMI



ES.2: Peta yang menunjukkan potensi panas bumi kumulatif antara 0 meter dan 5000 meter, dengan batas suhu sebesar 150°C, yang mewakili ambang batas minimum untuk pembangkitan listrik, dilapisi dengan pembangkit listrik tenaga batu bara dan kesesuaiannya untuk konversi panas bumi berdasarkan Analisis Lapisan Tertimbang Project InnerSpace. GW = gigawatt. Sumber: Project InnerSpace. (2025). *Today's Power Potential GW 5000m* [Power Generation Module]. GeoMap; Project InnerSpace. (2025). *Coal Plant WOA* [Indonesia Module]. GeoMap

pengembangan hidrotermal yang telah terbukti dengan sistem generasi berikutnya yang modular, jaringan termal, dan *district cooling* untuk melayani kota yang sedang berkembang dan koridor industri.

Peluang ini secara langsung mendukung transisi batu bara Indonesia. Batu bara memasok sekitar 40% dari energi primer Indonesia,[5] dan banyak industri mengandalkan ketel batu bara untuk menghasilkan panas. Pengerahan sekitar 15 gigawatt listrik dan 15 gigawatt termal dalam satu dekade—peningkatan hingga 25 gigawatt listrik dan 35 gigawatt termal pada tahun 2045—dapat menggantikan sebagian besar penggunaan batu bara ini. Di sektor ketenagalistrikan, penambahan ini dapat meningkatkan pembangkitan energi terbarukan hingga sekitar 67% pada tahun 2045,[6] yang memungkinkan penghentian dini atau pengalihan fungsi pembangkit listrik tenaga batu bara di Jawa dan Sumatra, yang memiliki keselarasan prospek dan permintaan panas bumi.

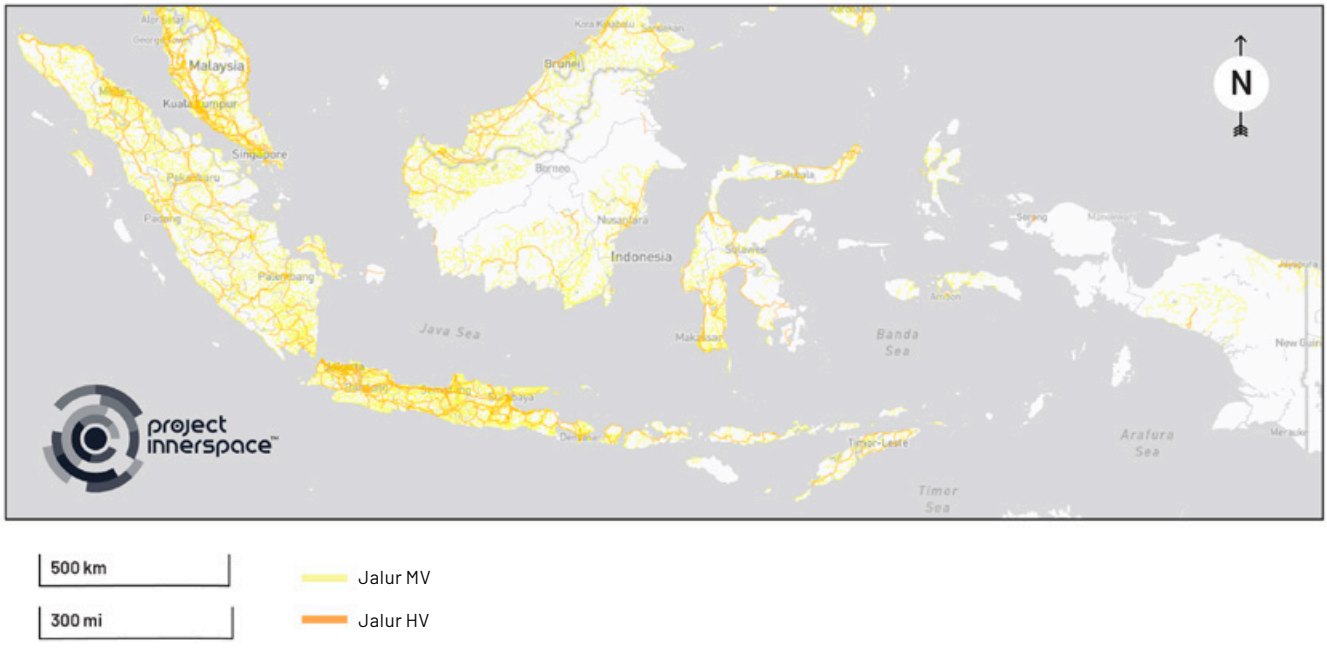
Peraturan terbaru menetapkan jalur untuk penghentian dini penggunaan batu bara dan penggantiannya dengan pembangkit listrik energi terbarukan. Panas bumi generasi berikutnya dapat mempercepat transisi ini dengan mengalihkan fungsi lokasi pembangkit listrik yang ada, memanfaatkan simpul transmisi yang berdekatan, dan menggunakan air limbah pembangkit listrik untuk mendukung reservoir yang direkayasa (lihat **Gambar ES.2**). Pembangkit listrik lama seperti Suralaya dan Bukit Asam terletak dekat dengan zona panas bumi berkualitas tinggi dan dapat berfungsi sebagai lokasi konversi awal.

Tenaga kerja Indonesia telah memiliki pengalaman selama puluhan tahun dalam pengembangan panas bumi, yang didukung oleh ahli geosains dan pengebor dalam jumlah besar. Sektor minyak dan gas Indonesia yang berpengalaman juga memiliki rig, layanan, dan praktik keselamatan yang mudah dialihkan ke panas bumi. Perguruan tinggi, badan usaha milik negara, dan pengembang swasta telah lama berkolaborasi dalam eksplorasi, pengeboran, dan operasi lapangan, sehingga menciptakan rantai pasokan terpadu yang dapat diperluas dan dialihkan untuk mempercepat pengembangan panas bumi konvensional tambahan dan demonstrasi generasi berikutnya.

Peningkatan pengembangan energi panas bumi juga mendukung keandalan jaringan listrik. Sistem tenaga listrik Indonesia masih terfragmentasi: Jawa–Madura–Bali dan sebagian Sumatra saling terhubung, sementara banyak pulau lainnya yang bergantung pada jaringan listrik yang lebih kecil dan terisolasi (lihat **Gambar ES.3**). Hampir semua potensi energi terbarukan berada di luar Jawa, meskipun Jawa menggunakan sebagian besar listrik nasional. RUKN memperkirakan perluasan transmisi secara besar-besaran—48.000 kilometer jaringan baru dan 108.000 gardu induk—untuk menutup kesenjangan ini. Pembangkit listrik tenaga panas bumi yang ditempatkan secara strategis dapat mengurangi tekanan pada infrastruktur baru dengan menyediakan tenaga listrik yang solid dan dapat didistribusikan di dekat pusat permintaan; menstabilkan jaringan listrik; dan mengurangi penyimpanan serta transmisi jarak jauh yang diperlukan untuk mengintegrasikan tenaga surya dan bayu.

Secara keseluruhan, perluasan panas bumi untuk listrik, pemanasan industri, dan pendingin menempatkan panas bumi sebagai fondasi utama bagi Indonesia mencapai 70% energi terbarukan pada tahun 2060. Perluasan ini mengurangi biaya energi, menarik investasi swasta, menciptakan lebih dari 650.000 pekerjaan, meningkatkan stabilitas jaringan listrik, dan meningkatkan pembangunan daerah.

JARINGAN LISTRIK INDONESIA HINGGA SAAT INI



Gambar ES.3: Jaringan transmisi Indonesia, yang menyoroti interkoneksi Jawa dan jaringan listrik yang lebih kecil dan terisolasi di berbagai pulau lainnya. HV = tegangan tinggi; MV = tegangan menengah. Sumber: Arderne, C., Zorn, C., Nicolas, C., & Koks, E. E. (2020). Predictive mapping of the global power system using open data. *Scientific Data, 7,* 19; Kontributor OpenStreetMap. (2023). *Planet OSM;* OpenStreetMap. (n.d.). *OpenStreetMap.*

Perluasan panas bumi di Indonesia yang melampaui sumber daya hidrotermalnya saat ini membawa banyak keuntungan:

- **Kemandirian energi:** Indonesia dapat memperoleh keuntungan dari pemanfaatan panas domestik untuk mengurangi impor bahan bakar, menopang beban penting seperti kawasan industri dan pusat data, serta mempertahankan nilai tetap berada dalam perekonomian lokal.
- **Selalu menyala, di mana pun:** Panas bumi menyediakan listrik dan energi termal sepanjang waktu; menstabilkan sistem yang masih terfragmentasi; meringankan puncak beban dengan pendinginan; dan dapat ditempatkan di Jawa, Sumatra, Sulawesi, Bali–Nusa Tenggara, Kalimantan, dan Papua.
- **Pekerjaan dan investasi:** Perluasan panas bumi dapat memobilisasi modal swasta; memperluas rantai pasokan Indonesia; dan mendukung lebih dari 650.000 pekerjaan terampil dalam kegiatan eksplorasi, pengeboran, konstruksi, operasi, dan layanan. **Peningkatan daya saing:** Indonesia memiliki potensi termal sebesar 60 terawatt yang dapat dimanfaatkan melalui pemanasan dengan pemanfaatan langsung dan *district cooling* untuk menurunkan biaya bahan bakar bagi industri dan bangunan. Listrik generasi berikutnya memperluas pilihan lokasi, sehingga memanfaatkan basis teknis sebesar sekitar 2.160 gigawatt.
- **Pengerahan berdampak rendah dan siap digunakan kembali:** Panas bumi generasi berikutnya dapat ditempatkan di daerah yang kurang sensitif terhadap lingkungan, menggunakan jauh lebih sedikit lahan dan transmisi baru daripada sebagian besar alternatif, dan mengalihkan fungsi lokasi pembangkit listrik tenaga batu bara yang sudah tidak digunakan serta koridor yang ada untuk memangkas biaya dan mempercepat pengiriman.
- **Udara yang lebih bersih, emisi yang lebih rendah:** Dengan mengganti batu bara, solar, dan minyak tungku dalam pembangkitan listrik, pemanasan, dan pendingin, panas bumi mengurangi gas rumah kaca dan polutan lokal, sehingga membantu Indonesia memenuhi target energi terbarukannya hingga tahun 2030 dan tujuan energi bersih jangka panjangnya pada tahun 2060 sekaligus memberikan manfaat kesehatan masyarakat secara langsung.

PERUNDANG-UNDANGAN, PERATURAN, DAN KEBIJAKAN YANG DIREKOMENDASIKAN UNTUK MEMPERLUAS INDUSTRI PANAS BUMI INDONESIA

Kerangka panas bumi Indonesia sedang berkembang, tetapi negara harus melakukan pembaruan hukum untuk sepenuhnya memungkinkan pengembangan panas bumi generasi berikutnya yang diidentifikasi dalam laporan ini. Tindakan prioritas termasuk memperbarui definisi dan perizinan untuk secara tegas mengizinkan panas bumi generasi berikutnya, panas dengan pemanfaatan langsung, dan *district cooling*, yang memberikan kejelasan yang dibutuhkan untuk melangkah maju dengan percaya diri kepada para pengembang dan pemodal. 10 rekomendasi yang diuraikan dalam Bab 7, "*Turning Potential into Power: A Policy Blueprint for Indonesia's Geothermal Transformation*," didasarkan pada instrumen Indonesia yang ada dan praktik terbaik global untuk menyediakan peta jalan tersebut. (Lihat **Gambar ES.4**).

Untuk mencapai tujuan nasional yang diusulkan sebesar 15 gigawatt listrik dan 15 gigawatt termal pada tahun 2035, yang ditingkatkan menjadi 25 gigawatt listrik dan 35 gigawatt termal pada tahun 2045, Indonesia memerlukan landasan hukum yang mencerminkan perkembangan sektor tersebut. Perundang-undangan saat ini—khususnya Undang-Undang Panas Bumi No. 21/2014 dan Peraturan Pemerintah No. 7/2017, yang keduanya ditujukan untuk sistem hidrotermal konvensional—belum mengakui reservoir yang direkayasa, sistem *closed-loop*, atau pemanasan dan pendinginan panas bumi, meskipun potensinya untuk memenuhi hampir 90% dari permintaan termal yang diperkirakan pada pertengahan abad ini. Memperbarui instrumen ini untuk mendefinisikan dengan jelas sistem panas bumi dan pemanfaatan langsung generasi berikutnya akan memberikan kepastian investasi dan menyelaraskan kerangka regulasi Indonesia dengan potensi teknisnya sebesar 2.160 gigawatt.

Pencapaian tujuan pengerahan nasional ini juga akan memerlukan perizinan yang lebih koheren dan dapat



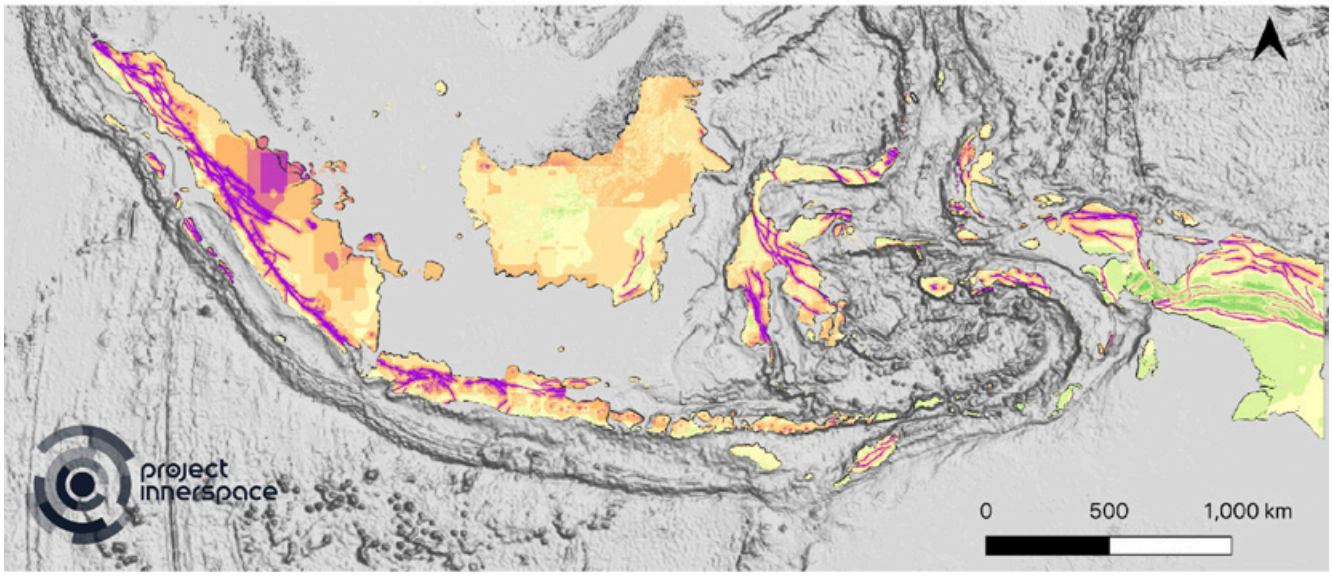


ES.4: Tinjauan umum 10 rekomendasi kebijakan untuk membantu membuka era baru pertumbuhan panas bumi di Indonesia. Sumber: penulis

diprediksi serta koordinasi antarkementerian yang lebih baik. Bahkan dengan platform *Online Single Submission*, proyek panas bumi masih menghadapi masalah seperti wewenang yang terfragmentasi, peninjauan multitahap, dan proses persetujuan yang lambat. Jalur cepat khusus panas bumi yang diprakarsai oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KemenESDM) sebagai otoritas koordinasi tunggal akan menyederhanakan perizinan, mengurangi prosedur yang tumpang tindih, dan menetapkan jadwal berdasarkan undang-undang yang sesuai dengan urgensi target Indonesia tahun 2035 dan 2045. Mengintegrasikan Klasifikasi Baku Lapangan Usaha Indonesia (KBLI) yang telah diperbarui untuk pemanasan dan pendinginan dengan pemanfaatan langsung—bersama dengan perluasan persyaratan data terbuka dan percepatan implementasi mekanisme pembagian risiko tahap awal seperti Skema Pengeboran Pemerintah[7] dan Proyek Mitigasi Risiko Sumber Daya Panas Bumi[8]—akan memberi jalur yang jelas dan lebih dapat diandalkan kepada para pengembang sejak tahap eksplorasi sampai dengan konstruksi. Secara bersama-sama, reformasi ini akan membantu memobilisasi modal swasta dan publik dengan skala yang diperlukan untuk fase pertumbuhan panas bumi Indonesia berikutnya.

Pada akhirnya, kemajuan jangka panjang bergantung pada kepercayaan masyarakat dan manfaat lokal yang terlihat jelas, terutama saat pembangunan meluas

PETA SUMBER DAYA PANAS BUMI INDONESIA



Gambar ES.5: Peta sumber daya panas bumi Indonesia yang mengidentifikasi wilayah yang paling cocok untuk teknologi panas bumi berdasarkan karakteristik termal dan bawah permukaan tanah yang mendasari, melalui Analisis Lapisan Tertimbang Project InnerSpace, yang dirancang untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan wilayah dengan potensi panas bumi berdasarkan faktor geologi dan geofisika utama. Sumber: Project InnerSpace. (2025). *Rangkaian Data Analisis Lapisan Tertimbang Indonesia.*

ke lebih banyak wilayah. Sementara pembagian pendapatan panas bumi melalui Dana Bagi Hasil (DBH) menyediakan saluran keuangan bagi daerah tuan rumah, hasilnya sangat beragam dan sering kali kurang transparan, sehingga menimbulkan keraguan.

Penyelarasan pendapatan panas bumi dalam bonus produksi panas bumi terpadu dengan menggabungkan DBH, pendapatan panas bumi bukan pajak, dan kontribusi pengembang akan menciptakan sistem yang transparan dan bertanggung jawab untuk berinvestasi di sekolah, klinik, jaringan pendinginan dengan panas bumi, uji coba pemanasan industri, dan pelatihan tenaga kerja dalam masyarakat tuan rumah. Menghubungkan akses dana dengan kepatuhan terhadap persetujuan atas dasar informasi di awal tanpa paksaan; kewajiban tanggung jawab sosial perusahaan; dan Sertifikat Kelaikan Operasional memastikan bahwa masyarakat berpartisipasi secara langsung dalam manfaat pembangunan. Sistem yang tepercaya dan berpusat pada masyarakat akan membantu mempertahankan laju pengerahan panas bumi yang diperlukan untuk memenuhi ambisi Indonesia pada tahun 2035 dan 2045—dan menyiapkan landasan untuk menargetkan pembangunan di berbagai wilayah dengan potensi sumber daya terbesar.

MEMPERLUAS CAKUPAN

Bab 3, "*Beneath the Archipelago: Indonesia's Geothermal Systems*," dan tambahannya, "*Expanding the Scope: Next-Generation Geothermal Opportunities*," mengidentifikasi peluang panas bumi di Jawa, Sumatra, Sulawesi, Bali–Nusa Tenggara, Kalimantan, dan Papua. Hidrotermal konvensional tetap penting di ladang yang telah terbukti,

dengan *step-outs*, sumur pengganti, dan penambahan kapasitas. Secara paralel, sistem generasi berikutnya—yang membuka panas di area dengan permeabilitas dan cairan terbatas—memperluas lokasi di mana proyek panas bumi dapat dilaksanakan. Aspek ini mencakup potensi untuk mengalihkan fungsi instalasi energi dan industri seperti lokasi pembangkit listrik tenaga batu bara yang sudah tidak digunakan dan *brownfield*, yang mengurangi biaya interkoneksi dan memanfaatkan jalan, landasan, dan transmisi yang ada.

Selain itu, banyak desain generasi berikutnya yang memiliki jejak permukaan yang lebih kecil per unit energi yang disalurkan, sehingga menyederhanakan pengelolaan lingkungan dan mengurangi potensi dampaknya terhadap masyarakat. Fitur ini menyebabkan antara lain lebih banyak komunitas dan wilayah yang dapat memanfaatkan teknologi tersebut. Sistem generasi berikutnya juga dapat dipadukan dengan penyimpanan termal untuk mengalihkan panas dan pendinginan ke puncak harian, sehingga memberikan fleksibilitas operasional di seluruh pulau dan jenis jaringan listrik.

Portofolio gabungan—konvensional di tempat yang paling baik dan panas bumi generasi berikutnya di tempat yang paling praktis—dapat memanfaatkan potensi panas bumi Indonesia yang besar secara maksimal. (Lihat **Gambar ES.5**).

PELUANG INDONESIA YANG PALING MENJANJIKAN: PEMANFAATAN LANGSUNG PANAS BUMI

Pemanfaatan langsung panas bumi merupakan peluang panas bumi Indonesia yang paling menjanjikan dan tumbuh paling cepat, dengan potensi untuk mengubah baik pemanasan industri maupun pendinginan perkotaan. Bab 4, "*Beyond Electricity: Indonesia's Thermal Energy Demand and Direct Use Potential*," menunjukkan bahwa panas bumi sudah dapat memenuhi 66,5% dari permintaan termal nasional, sehingga meningkat hingga hampir 90% pada tahun 2050 dan menggantikan sebagian besar batu bara dan minyak yang sekarang digunakan untuk proses pemanasan dan pendinginan. Dengan kata lain: Sektor termal saat ini memancarkan sekitar 241 metrik ton setara karbon dioksida ($MtCO_2e$). Peralihan ke panas bumi dengan pemanfaatan langsung dapat menghindari sekitar 160 $MtCO_2e$ setiap tahun dan mencapai 44% dari tujuan iklim sektor energi Indonesia tahun 2030. Peluangnya sangat baik terutama dalam industri dengan kebutuhan suhu di bawah 200°C—tekstil, pengolahan hasil pertanian, susu, pulp dan kertas, serta makanan dan minuman—di mana panas bumi dapat langsung menggantikan ketel berbahan bakar fosil.

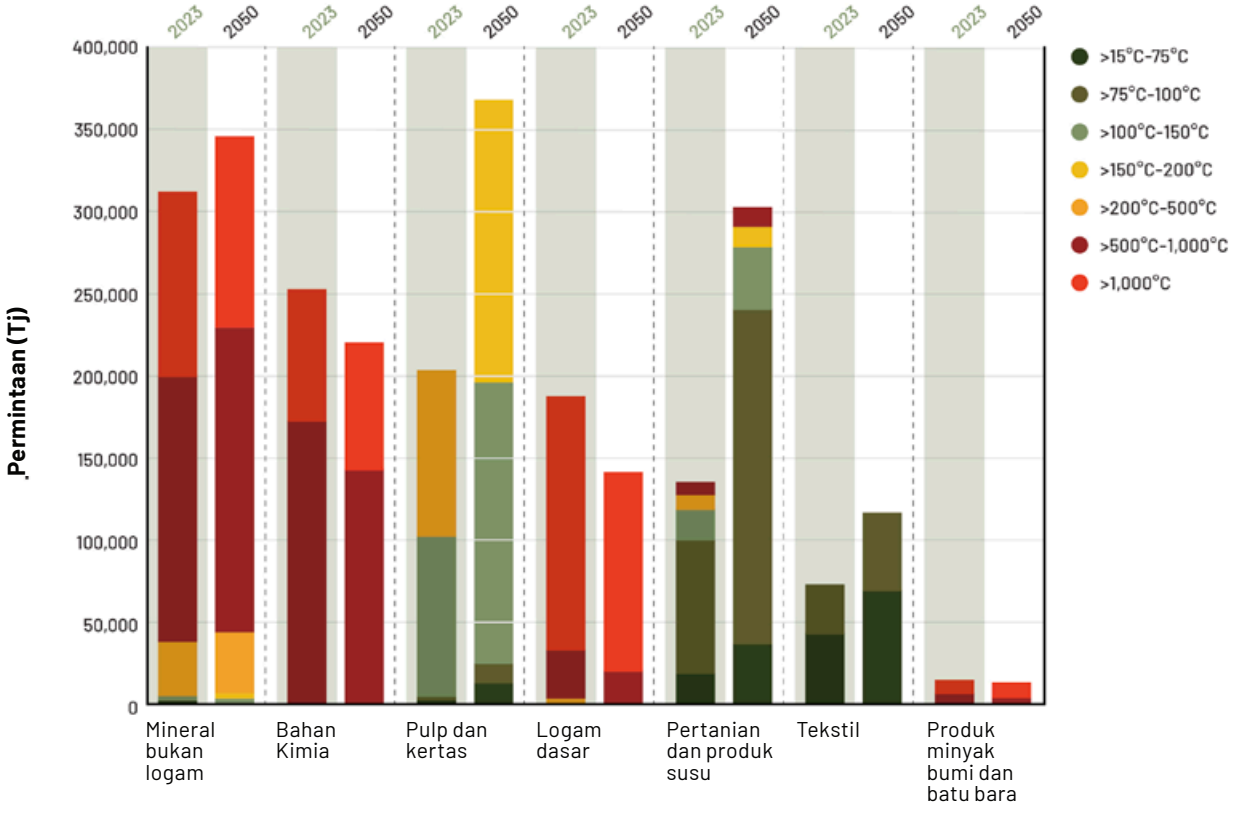
Panas bumi sudah dapat memenuhi 66,5% dari permintaan termal nasional, sehingga meningkat hingga hampir 90% pada tahun 2050 dan menggantikan sebagian besar batu bara dan minyak yang sekarang digunakan untuk proses pemanasan dan pendinginan. Dengan kata lain: Sektor termal saat ini memancarkan sekitar 241 metrik ton setara karbon dioksida ($MtCO_2e$). Peralihan ke panas bumi dengan pemanfaatan langsung dapat menghindari sekitar 160 $MtCO_2e$ setiap tahun dan mencapai 44% dari tujuan iklim sektor energi Indonesia tahun 2030.

Pendinginan merupakan pendorong permintaan listrik yang tumbuh paling cepat di Indonesia, dengan kepemilikan penyejuk udara (AC) yang diperkirakan mencapai 85% pada tahun 2050, sehingga sangat membebani jaringan listrik di pusat populasi perkotaan besar. Pendinginan panas bumi—melalui sistem yang terhubung ke tanah, pendinginan sumber akuifer, dan jaringan *district cooling*—menawarkan alternatif yang dapat ditingkatkan skalanya dan hemat lahan. Misalnya, Eropa secara luas mengerahkan pemanasan panas bumi di daerah perkotaan, dan Indonesia dapat melakukan hal yang sama untuk pendinginan panas bumi. **Memenuhi bahkan 10% dari permintaan pendinginan Indonesia tahun 2040 yang diproyeksikan dengan panas bumi dapat menghindari antara 10 gigawatt dan 15 gigawatt permintaan daya puncak dan mencegah puluhan juta ton emisi karbon dioksida setiap tahun.**[9] **Melakukan hal tersebut juga akan meringankan beban pada jaringan listrik selama jam-jam puncak.**

Peluang pemanfaatan langsung tersedia di seluruh koridor industri, kampus, rumah sakit, bandar udara, dan wilayah baru seperti Nusantara, yang semuanya dapat menyediakan jaringan panas bumi untuk pemanasan dan pendinginan. Kota pesisir dan delta—



PERMINTAAN TERMAL UNTUK PEMANASAN INDUSTRI DAN MANUFAKTUR TAHUN 2023 VERSUS TAHUN 2050



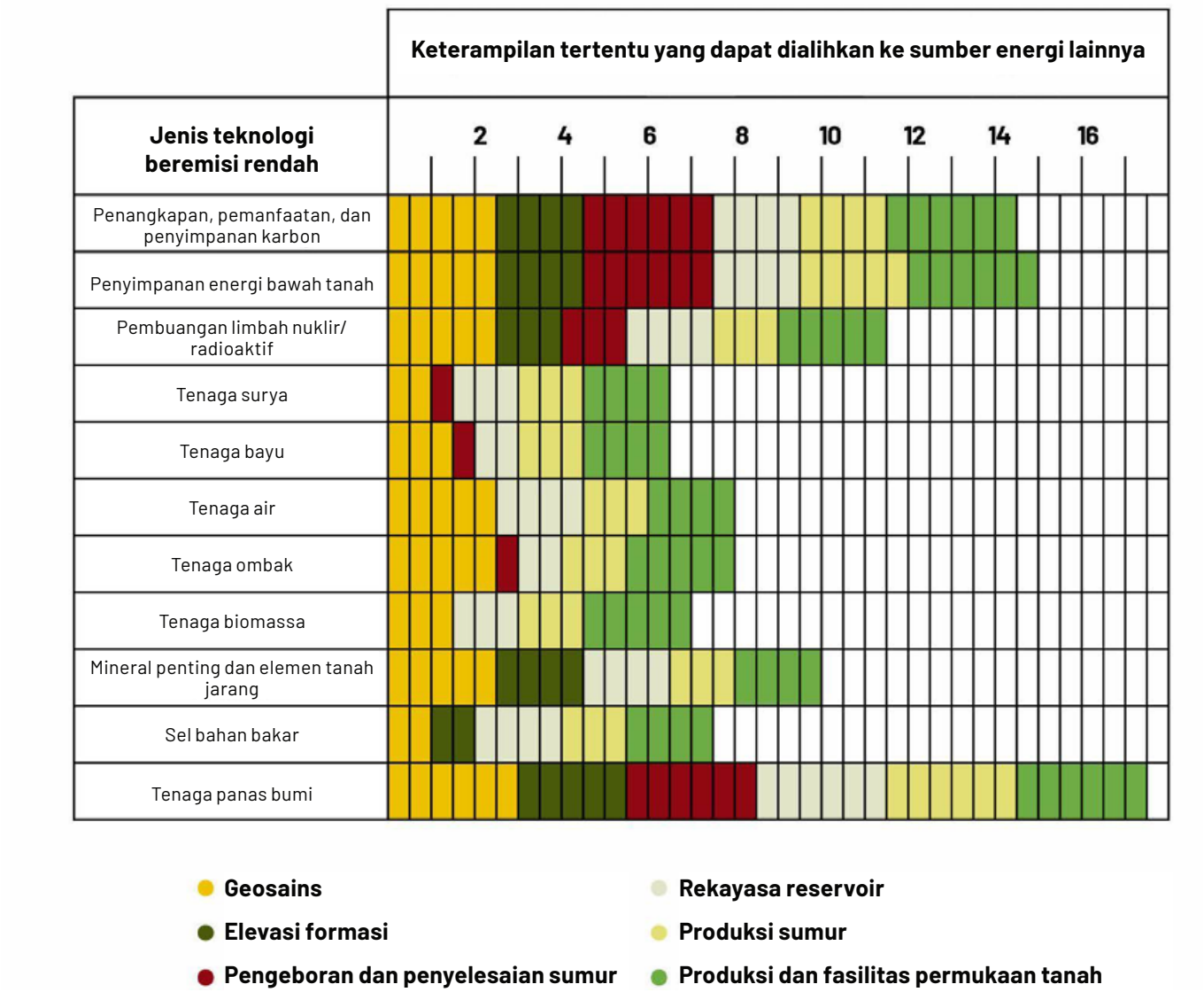
Gambar ES.6: Total permintaan termal pemanasan industri dan manufaktur Indonesia berdasarkan suhu pada tahun dasar 2023 dan prakiraan untuk tahun 2050. Daftar sumber yang lengkap dapat ditemukan di akhir Bab 4, *"Beyond Electricity: Indonesia's Thermal Energy Demand and Direct Use Potential."*

Pusat Data

Sumber daya panas bawah permukaan tanah Indonesia yang luar biasa tidak boleh diabaikan sebagai sumber energi untuk pusat data. Panas bumi dapat menghasilkan tenaga listrik yang bersih dan selalu menyala di sumbernya serta memangkas biaya listrik rata-rata antara sepertiga dan setengahnya dibandingkan dengan model yang bergantung pada jaringan listrik. PLN sudah melayani sekitar 1 gigawatt beban pusat data, tetapi permintaan diproyeksikan mencapai 4 gigawatt pada tahun 2033, dengan persyaratan pemrosesan kecerdasan buatan (AI) yang berpotensi menggandakan proyeksi tersebut sebesar dua atau tiga kali lipat. Panas bumi generasi berikutnya dapat membuka koridor digital utama seperti Jakarta–Purwakarta, Surabaya, Batam, dan Medan dengan menempatkan daya beban dasar yang andal dan rendah karbon langsung di bawah simpul serat utama dan klaster industri.

Batam merupakan lokasi yang sangat strategis karena dapat memasok tenaga panas bumi yang baik dengan latensi yang sangat rendah melintasi selat ke Singapura, pusat data yang terbatas. Dengan kata lain, Batam dapat menjadi tuan rumah bagi pusat pemrosesan data yang ramah lingkungan dan berkepadatan tinggi yang tidak dapat disediakan oleh Singapura di dalam wilayahnya sendiri, sehingga berfungsi sebagai perpanjangan tulang punggung digital Singapura. Saat perusahaan teknologi global mencari daya rendah karbon yang selalu menyala untuk beban kerja AI dan *cloud*, hanya sedikit negara yang memadukan kapasitas panas bumi, konektivitas serat, dan kedekatan dengan pusat data kelas dunia seefektif Indonesia.

KETERAMPILAN YANG DAPAT DIALIHKAN DARI INDUSTRI MINYAK DAN GAS

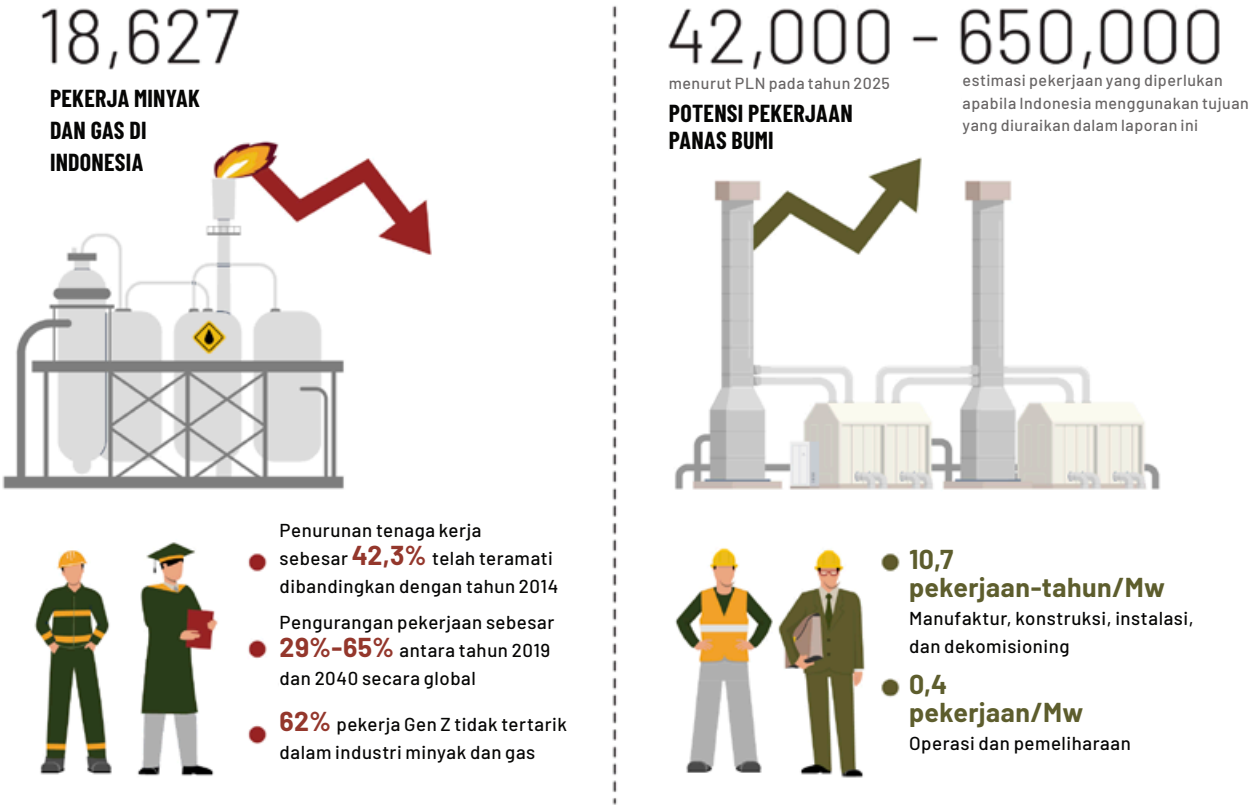


Gambar ES.7: Panas bumi menempati peringkat tertinggi ketika mempertimbangkan dampak potensial pengalihan keterampilan minyak dan gas ke transisi energi lainnya dan teknologi rendah karbon. Sumber: Tayyib, D., Ekeoma, P. I., Offor, C. P., Adetula, O., Okoroafor, J., Egbe, T. I., & Okoroafor, E. R. (2023). *Oil and gas skills for low-carbon energy technologies. Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition.*

di mana penduduk dalam jumlah besar dan permintaan yang terkonsentrasi selaras dengan geologi yang menguntungkan—sangat cocok untuk pendinginan bawah permukaan tanah.

Peningkatan skala sistem tersebut tidak hanya memerlukan investasi dan perizinan yang efisien tetapi juga tenaga kerja multidisiplin yang terampil dan mampu mengebor, mengoperasikan, dan memelihara sistem panas bumi generasi berikutnya. Seiring dengan meluasnya penerapan pemanasan industri dan jaringan *district cooling* di Indonesia, penting untuk mengembangkan talenta khusus ini—ahli teknik, pengebor, teknisi, dan operator sistem. Peluncuran uji coba pendinginan panas bumi adalah cara tercepat untuk membangun keterampilan, standar, dan rantai pasokan yang dibutuhkan untuk pengerahan di seluruh Indonesia.

POTENSI TRANSISI PEKERJAAN DARI MINYAK DAN GAS KE PANAS BUMI



Gambar ES.8: Jumlah potensi transisi pekerjaan yang diperkirakan dari minyak dan gas ke panas bumi. Sumber: *Indonesian Petroleum Association.* (2017). *Indonesia overview;* Satuan Kerja Khusus Pelaksana Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi (SKK Migas). (2023). *Laporan tahunan 2023;* Ernst & Young. (2020). *Preparing for the future now: Rethinking the oil and gas workforce in 2040.* EY Global; Halimatussadiah, A., Irhamni, M., Riefky, T., Nur Ghiffari, M., & Razak Afifi, F. A. (2024). *Employment impacts of energy transition in Indonesia.* Lembaga Penelitian Ekonomi dan Masyarakat, Universitas Indonesia; PLN. (2025). *Rencana usaha penyediaan tenaga listrik PLN (2025-2034): Meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan energi nasional.* Pemerintah Indonesia.

MEMANFAATKAN PENGETAHUAN TEKNIS YANG ADA

Ekosistem pengeboran minyak dan gas dan panas bumi konvensional Indonesia memiliki rig, pengebor, *cementing crew*, spesialis pencatatan, tim stimulasi, dan manajer proyek yang keterampilannya dialihkan langsung ke pengembangan panas bumi (lihat **Gambar ES.7**). Tergantung pada seberapa banyak panas bumi yang diproduksi, estimasi lapangan kerja baru yang tercipta berkisar antara 42.000 hingga lebih dari 650.000 apabila Indonesia memenuhi target listrik dan termal gabungan yang diuraikan dalam laporan ini (lihat **Gambar ES.8**). Akan tetapi, perguruan tinggi tidak menghasilkan lulusan dengan skala yang mendekatinya. Indonesia saat ini menghasilkan kurang dari 20 lulusan yang berfokus pada panas bumi per tahun. Pemenuhan bahkan permintaan tenaga kerja tingkat rendah akan membutuhkan jumlah lulusan enam hingga tujuh kali lebih banyak; sementara kisaran yang lebih tinggi akan membutuhkan antara 15 hingga 30 kali lebih banyak. Warisan minyak dan gas Indonesia yang panjang merupakan salah satu aset terbesarnya untuk membangun tenaga kerja panas bumi dan memberikan kepada Indonesia sejumlah talenta siap pakai yang ditempatkan dengan baik untuk mengisi kesenjangan ini.

Kesenjangan ini menggarisbawahi perlunya koordinasi yang lebih baik antara Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas); KemenESDM; Kementerian Ketenagakerjaan; dan Kementerian Pendidikan Tinggi, Ilmu Pengetahuan, dan Teknologi,

yang mandat perencanaan, pelatihan, sertifikasi, dan kurikulumnya saat ini terfragmentasi dan sulit dipahami oleh industri. Penyelarasan kelembagaan yang lebih baik—terutama melalui pemetaan pekerjaan yang terpadu, kerangka kompetensi yang terstandardisasi, dan jalur sertifikasi yang diperluas—sangat penting untuk memenuhi laju dan skala pengembangan panas bumi.

Menyorot kesinambungan ini melalui penjangkauan perguruan tinggi, program kejuruan, dan sertifikasi jalur cepat yang disederhanakan dapat membantu bidang panas bumi menarik mahasiswa yang mungkin awalnya akan beralih ke minyak dan gas, yang minat kariernya tetap tinggi. Dengan investasi yang tepat dalam pelatihan dan koordinasi kelembagaan, Indonesia dapat mengembangkan tenaga kerja yang tidak hanya mampu mendukung perluasan panas bumi berskala gigawatt tetapi juga antusias dengan peluang untuk membantu membentuk masa depan energi bersih Indonesia.

PERTUMBUHAN BERDAMPAK RENDAH YANG MEMBERIKAN MANFAAT SECARA LOKAL

Manfaat panas bumi lebih dari sekadar keuntungan karbon dan kualitas udara; dengan tata kelola yang tepat, sektor tersebut juga dapat memperkuat keadilan sosial dan kesejahteraan bersama. Indonesia telah memiliki fondasi untuk pengembangan panas bumi yang adil melalui mekanisme pembagian pendapatannya dan konsepnya yang sedang berkembang untuk dana panas bumi yang transparan, yang dapat menyalurkan alokasi DBH, royalti, dan komitmen perusahaan secara langsung ke masyarakat wilayah adat dengan visibilitas dan akuntabilitas yang lebih jelas. (Lihat Bab 6, "*Common Ground: Building Trust and Transparency in Indonesia's Energy Transition.*") Penguatan pendekatan ini juga akan mendukung administrasi yang lebih efektif di seluruh kementerian, sehingga memberikan struktur yang lebih jelas tentang bagaimana manfaat dilacak, disalurkan, dan dilaporkan di tingkat nasional dan daerah. Koordinasi yang lebih baik—terutama antara KemenESDM, Kementerian Lingkungan Hidup, Kementerian Kehutanan, Kementerian Dalam Negeri, dan pemerintah daerah—dapat menyederhanakan proses keterlibatan masyarakat, mengurangi tumpang tindih, dan memastikan bahwa pengembangan panas bumi memperkuat kepercayaan lokal sekaligus mendukung pembangunan daerah yang inklusif.

Terakhir, dan yang paling penting, panas bumi merupakan salah satu pilihan energi Indonesia dengan dampak terendah. Sebagian besar potensi teknis panas bumi Indonesia sebesar 2.160 gigawatt terletak di luar ekosistem yang dilindungi, dan sistem generasi berikutnya dapat mengakses panas ini tanpa memasuki medan vulkanik yang curam atau kawasan konservasi dengan keanekaragaman hayati yang tinggi. Praktik modern—seperti desain *closed-loop*, injeksi ulang yang lebih baik, pemantauan mikroseismik, dan pengendalian kebisingan—semakin meminimalkan gangguan dan menjaga sumber daya air, sehingga memperkuat komitmen Indonesia terhadap pengelolaan lingkungan hidup. (Lihat Bab 8, "*Keeping Geothermal Green: Safeguarding Nature and Communities in a New Era of Growth.*") Pendekatan ini menjaga kecilnya jejak lahan dan menghindari pembukaan lahan berskala besar yang dibutuhkan oleh banyak teknologi terbarukan lainnya. Proyek generasi berikutnya juga sangat bergantung pada pekerjaan sipil, konstruksi, pemantauan, dan peran operasi yang dapat diisi oleh pekerja tidak terampil dan semi-terampil, sehingga memperluas jumlah warga negara Indonesia yang mendapatkan manfaat langsung dari pengembangan panas bumi sekaligus menjaga keutuhan zona ekologi yang sensitif.

KESIMPULAN

Dengan sumber daya yang besar dan keahlian domestik yang mendalam, Indonesia dapat memperluas panas bumi menjadi platform nasional tidak hanya untuk listrik tetapi juga untuk pemanasan industri, pendinginan, dan pertumbuhan pusat data. Jalannya sudah jelas: Menetapkan target yang ambisius; memperbarui kerangka hukum; meningkatkan skala pemanfaatan langsung; dan mengerahkan sistem generasi berikutnya di kawasan industri, kota, dan *brownfield*. Tindakan segera akan menghasilkan tenaga listrik yang andal, energi yang kompetitif untuk industri dan pusat data, udara yang lebih bersih bagi masyarakat, serta rantai pasokan dan tenaga kerja domestik kelas dunia. Perluasan fokus panas bumi Indonesia akan memberikan manfaat langsung dengan udara yang lebih bersih, biaya energi yang lebih rendah, dan lapangan kerja baru. Selain itu, manfaat ini akan bertahan selama beberapa dekade melalui daya yang tangguh, pengurangan impor bahan bakar, dan kemajuan yang stabil menuju tujuan iklim nasional.



REFERENSI BAB

1 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) 2025-2060*. Pemerintah Indonesia. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/28dd4-rukn.pdf

2 PT Perusahaan Listrik Negara (Persero). (2025). *Diseminasi RUPTL PLN 2025-2034: Melampaui RUPTL Terhijau*. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/06524-bahan-dirut-pln.pdf

3 Badan Energi Internasional (IEA). (2024). *The future of geothermal energy*. https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy. Lihat hal. 49.

4 IEA, 2024, hal. 90.

5 Analisis oleh IESR dengan menggunakan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KemenESDM). (2025). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*. Pemerintah Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-and-economic-statistics-of-indonesia-2024.pdf

6 Beberapa asumsi dibuat untuk melakukan perkiraan: (i) Faktor kapasitas diasumsikan sebesar 80%, yang dikutip dari Ea Energy Analyses. (2024). *Technology data for the Indonesian power sector 2024: Catalogue for generation and storage of electricity*. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/c4d42-technology-data-for-the-indonesian-power-sector-2024-annoteret-af-kb-.pdf). (ii) Total pembangkitan untuk skenario kapasitas panas bumi yang lebih tinggi tetap sama dengan total pembangkitan KemenESDM, *Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional*, 2025. Hal ini dilakukan dengan mengurangi pembangkitan dengan menggunakan batu bara.

7 Soerono, D. (4 Desember 2017). *Risk mitigation and the restructuring of geothermal funds in Indonesia*. ThinkGeoEnergy. https://www.thinkgeoenergy.com/risk-mitigation-and-the-restructuring-of-geothermal-funds-in-indonesia/

8 PT Sarana Multi Infrastruktur (Persero). (Agustus 2021). *Developer Manual – Indonesia Geothermal Resource Risk Mitigation Project (GREM)*. https://ftp.ptsmi.co.id/geothermal-resource-risk-mitigation-grem

9 Komisi Ekonomi dan Sosial Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk Asia dan Pasifik (*United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific*/UNESCAP) & Program Lingkungan Hidup Perserikatan Bangsa-Bangsa (*United Nations Environment Programme*/UNEP). (6 Agustus 2024). *Indonesia sets path for climate-friendly cooling with National Cooling Action Plan*. https://www.unescap.org/news/indonesia-sets-path-climate-friendly-cooling-national-cooling-action-plan



Bagian I

Pengetahuan Dasar Panas Bumi



Bab 1

Panas bumi 101: Gambaran Umum tentang Teknologi dan Aplikasi Panas Bumi Terbaru

Project InnerSpace

Panas bumi sebenarnya ada di seluruh lapisan bawah tanah. Berkat kemajuan teknologi yang dikembangkan dari industri minyak dan gas, kini kita dapat memanfaatkan sumber panas tersebut di lebih banyak lokasi dibandingkan sebelumnya. Artinya, potensi pengembangan energi panas bumi kini terbuka luas di berbagai tempat dan untuk beragam kebutuhan di seluruh dunia.

Energi panas bumi adalah sumber energi yang terbentuk secara alami, tersedia di mana-mana, dan bersih. Sekitar 6.400 kilometer di bawah kerak bumi, inti bumi memiliki suhu yang hampir sama panasnya dengan permukaan matahari — sekitar 6.000°C (lihat **Gambar 1.1**). Panas bumi tersebar di seluruh planet ini — baik di daratan maupun di dasar lautan — dan memiliki potensi energi yang cukup besar untuk memasok kebutuhan energi seluruh dunia ribuan kali lipat.

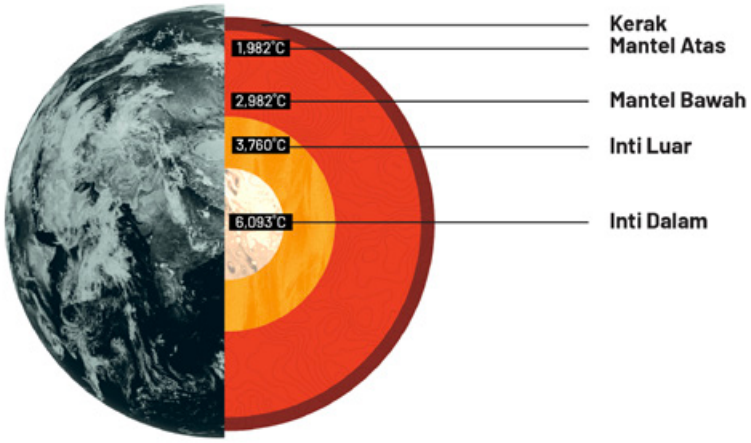
Sumber daya ini telah dimanfaatkan selama berabad-abad. Pada abad ke-19, manusia mulai menggunakan panas dari dalam bumi untuk berbagai keperluan industri, seperti memanaskan dan mendinginkan bangunan serta membangkitkan listrik. Catatan pertama penggunaan panas bumi untuk pembangkit listrik tercatat di Larderello, Italia, pada tahun 1904.[1]

Namun, sepanjang sejarah, sistem panas bumi konvensional (*hydrothermal*) ini memiliki keterbatasan secara geografis. Sistem tersebut hanya bisa berfungsi jika kondisi bawah tanahnya mendukung, yaitu terdapat suhu panas yang cukup, keberadaan air, dan celah atau pori batuan yang memungkinkan aliran fluida (permeabilitas), yang umumnya hanya ditemukan di wilayah dengan aktivitas tektonik tinggi seperti Indonesia, Islandia, dan bagian barat Amerika Serikat.[2] Sumber panas bumi baru dapat dimanfaatkan jika ketiga faktor tersebut saling bertemu. Bahkan, untuk menemukannya pun biasanya dibutuhkan tanda alami keempat, seperti munculnya geiser atau mata air panas di permukaan.[3] Kebutuhan akan kondisi khusus ini membuat pemanfaatan panas bumi secara global menjadi sangat terbatas, karena hanya sedikit lokasi di dunia yang memenuhi persyaratan alami tersebut.

Saat ini, energi panas bumi hanya menyumbang sekitar 0,5% dari total pembangkit listrik dunia.[4] Pemanfaatan energi ini jauh lebih tinggi di wilayah-wilayah vulkanik, di mana sumber daya panas bumi — yaitu sistem hidrotermal



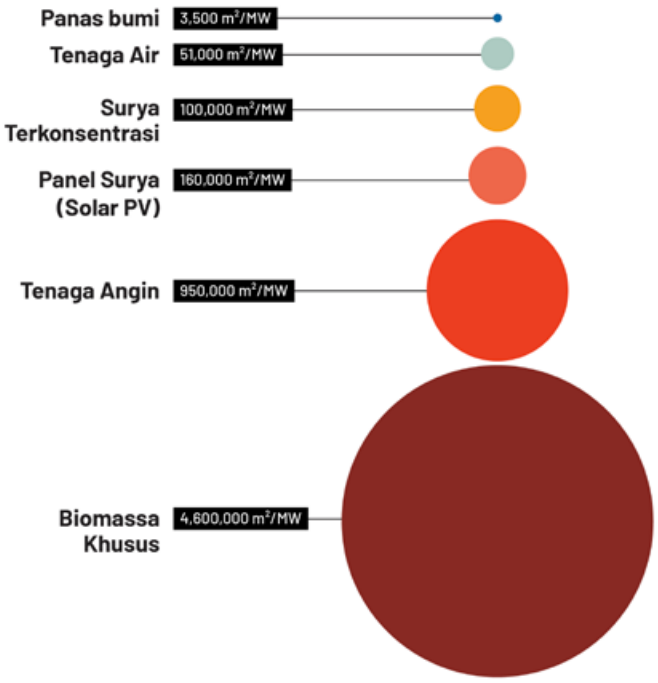
SUHU BAGIAN DALAM BUMI



Gambar 1.1: Suhu inti bumi melebihi suhu permukaan matahari. Karena kerak bumi merupakan lapisan isolator yang sangat baik, panas dalam jumlah besar terperangkap di bawah permukaan kita—cukup untuk memasok kebutuhan energi dunia ratusan kali lipat. Sumber: Project InnerSpace.

MEMBANDINGKAN JEJAK PERMUKAAN

Panas bumi memiliki jejak permukaan paling kecil dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya.



Gambar 1.2: Jejak permukaan proyek (*surface footprint*) — dihitung per acre untuk setiap 1 gigawatt kapasitas pembangkit — paling kecil untuk panas bumi dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya maupun batubara. PV = photovoltaic (tenaga surya). Sumber: Lovering, J., Swain, M., Blomqvist, L., & Hernandez, RR (2022). *Intensitas penggunaan lahan produksi listrik dan lanskap energi masa depan*. *PLOS SATU, 17*(7), e0270155; Laboratorium Energi Terbarukan Nasional (NREL). (2022). Penggunaan lahan oleh teknologi sistem.

Panas bumi memiliki keunggulan sebagai sumber energi bersih yang beroperasi terus-menerus 24 jam sehari, 7 hari seminggu, sepanjang tahun (24/7/365). Berbeda dengan angin dan surya, panas bumi selalu aktif. Berbeda dengan gas alam dan batubara, tidak menghasilkan emisi maupun membutuhkan bahan bakar. Dan tidak seperti tenaga nuklir, tidak perlu mengelola limbah radioaktif. Selain itu, seperti yang ditunjukkan pada* Gambar 1.2*, panas bumi memiliki jejak permukaan paling kecil dibandingkan semua sumber energi lainnya.

konvensional — berada sangat dekat dengan permukaan bumi. Indonesia merupakan produsen listrik panas bumi berskala utilitas terbesar kedua di dunia, dengan kapasitas mencapai 2.653 megawatt.[5] Sejak pembangkit listrik panas bumi pertama beroperasi pada tahun 1983,[6] Indonesia telah menjadi pemimpin global dalam produksi listrik panas bumi konvensional. Namun, hanya sekitar 5% jaringan listrik nasional yang masih bersumber dari sistem hidrotermal, yang menunjukkan adanya peluang besar untuk pengembangan lebih lanjut.[7]

Kini, pemanfaatan energi panas bumi dapat ditingkatkan di banyak lokasi lain di luar wilayah vulkanik. Bagaimana caranya?

Karena panas terdapat di seluruh lapisan bawah tanah, dan berkat kemajuan teknologi yang berasal dari industri minyak dan gas serta munculnya generasi baru wirausahawan panas bumi, kita kini dapat mengakses

sumber panas tersebut di luar kawasan ekosistem vulkanik yang sebelumnya menjadi batas utama potensi panas bumi di Indonesia. Proyek-proyek panas bumi yang memanfaatkan teknologi ini disebut sebagai panas bumi generasi baru (*next-generation geothermal*). Pendekatan baru ini — seperti sistem panas bumi lanjutan (*advanced geothermal systems*) dan pemanfaatan panas bumi untuk pendinginan — membuka masa depan energi panas bumi melampaui batasan geografis yang selama ini ada. (*Lihat bagian "Evolusi Panas Bumi: Dari Keterbatasan Menuju Peluang" pada bab ini.*)

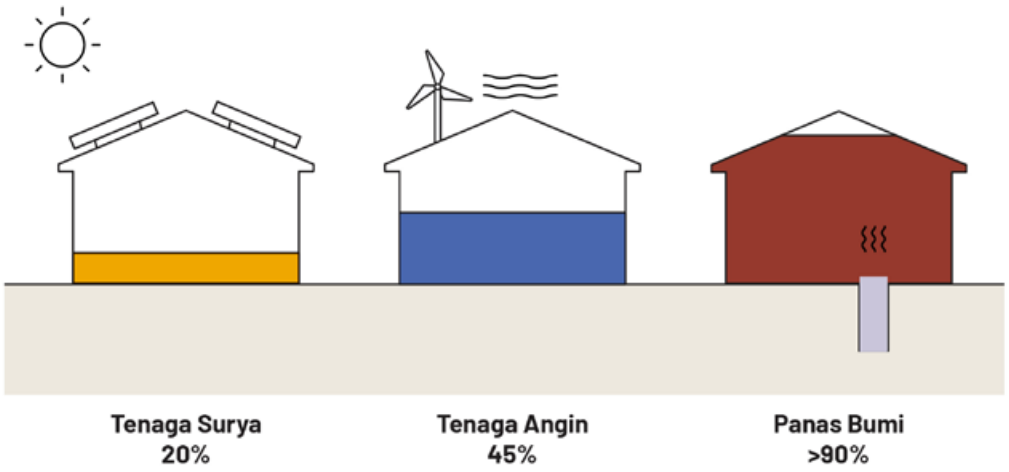
Teknologi-teknologi terbaru tersebut — seperti pengeboran terarah (*directional drilling*), pengeboran lebih dalam, teknik rekahan hidrolik (*hydraulic fracturing*) yang menciptakan ruang pori tambahan untuk aliran fluida, mata bor yang lebih efisien, serta pemasukan fluida ke area bawah permukaan yang secara alami tidak memilikinya — dapat sangat efektif untuk pembangkitan listrik. Teknologi ini memungkinkan kita untuk menciptakan reservoir panas buatan sebagai sumber energi baru.

PEMBANGKIT LISTRIK PANAS BUMI

Dengan teknologi baru, secara umum, semakin panas sumber daya geotermal, semakin efisien pembangkit listrik dalam menghasilkan energi. Semakin tinggi efisiensinya, semakin rendah biaya produksinya. Seperti terlihat pada **Gambar 1.4**, pembangkitan listrik tenaga panas bumi dapat dilakukan pada suhu fluida serendah 90°C menggunakan pembangkit siklus ganda (*binary cycle power plant*) — artinya terdapat dua siklus fluida.[8,9] Pada pembangkit jenis binary, air panas yang diambil dari reservoir mengalir melalui penukar panas (*heat exchanger*) untuk mendidihkan cairan lain dengan titik didih rendah. Uap dari cairan kedua inilah yang memutar turbin untuk menghasilkan listrik, sementara air panas geotermal tidak pernah langsung masuk ke turbin.[10] Kedua fluida berputar dalam sistem tertutup — cairan kerja didinginkan dan digunakan kembali, sementara air panas geotermal disuntikkan kembali ke bawah tanah, sehingga emisi sangat minimal sambil tetap memungkinkan pembangkitan listrik dari sumber bersuhu rendah hingga sedang. Turbin uap kilat (*flash steam*) dan uap kering (*dry steam*) (lihat **Gambar 1.5**) digunakan bila suhu fluida melebihi 180°C.[11] Beberapa instalasi dengan suhu lebih tinggi kini juga mulai menggunakan konfigurasi inovatif berbasis siklus ganda (*binary-type*).

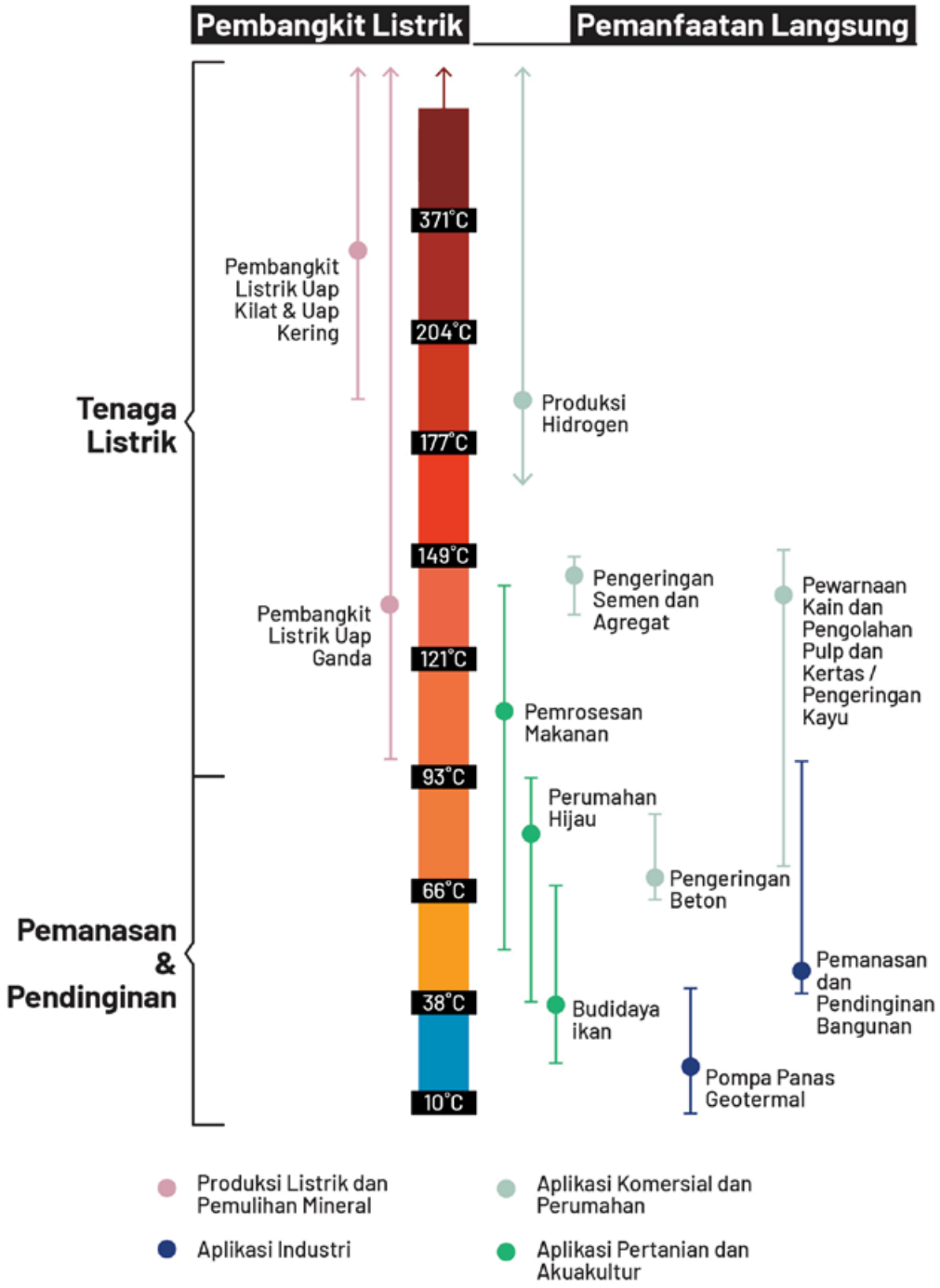
Sebuah laporan yang diterbitkan pada tahun 2024 oleh International Energy Agency (IEA) menyatakan bahwa "potensi panas bumi kini benar-benar bersifat global" dan sistem panas bumi generasi baru memiliki potensi teknis "untuk memenuhi kebutuhan listrik dunia hingga 140 kali lipat.[12] Analisis tersebut juga mencatat bahwa pada tahun 2035, panas bumi berpotensi menjadi sangat kompetitif dibandingkan tenaga surya fotovoltaik dan tenaga angin, terutama ketika dikombinasikan dengan penyimpanan energi berbasis baterai.

PERBANDINGAN FAKTOR KAPASITAS



Gambar 1.3: Faktor kapasitas adalah persentase waktu di mana sebuah pembangkit listrik menghasilkan listrik dalam satu hari tertentu. Sumber: Diadaptasi dari Badan Energi Internasional (IEA). (2024). *Masa depan energi panas bumi*. IEA.

APLIKASI PANAS BUMI DAN KEBUTUHAN TEMPERATUR



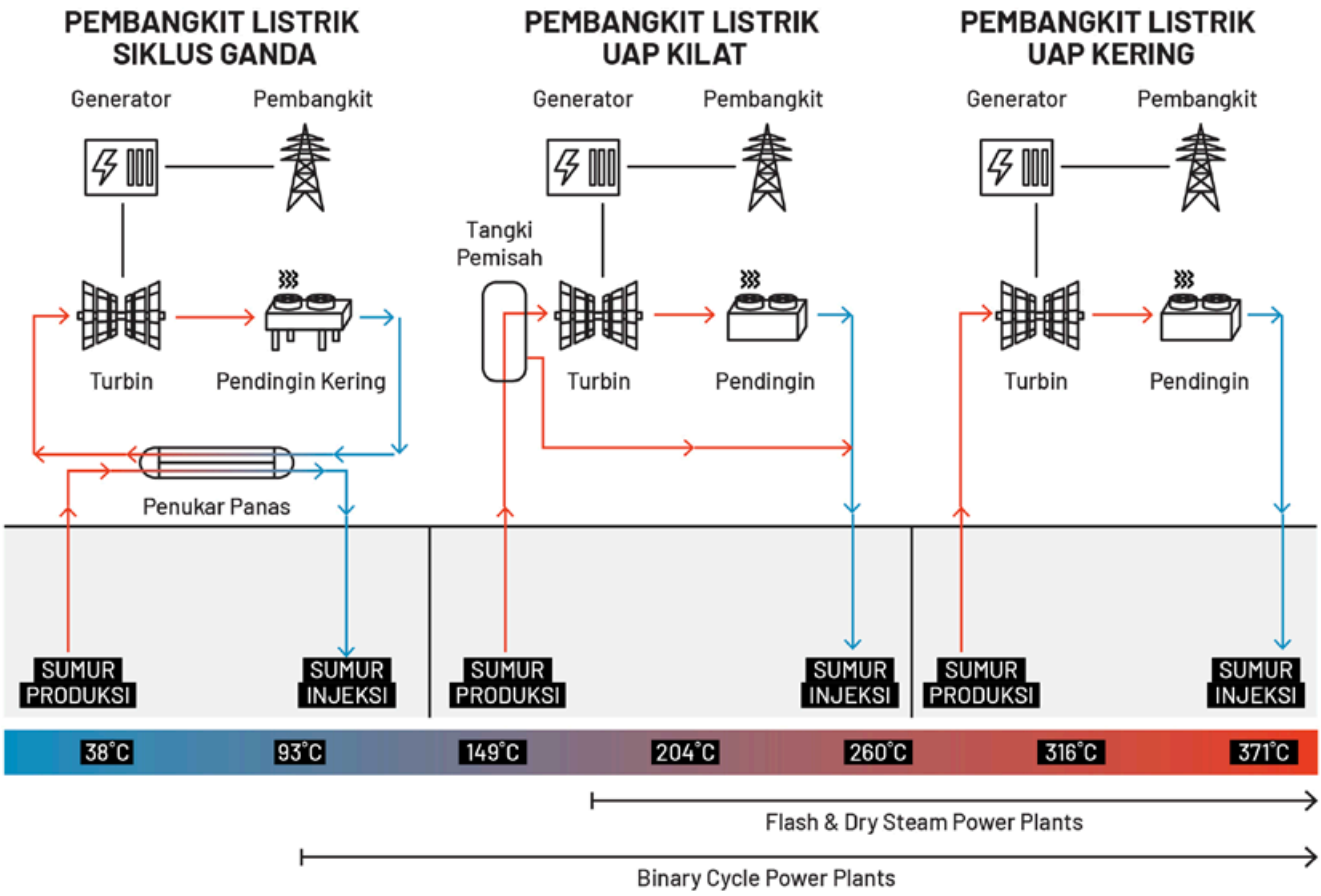
Gambar 1.4: Energi panas bumi dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik, memanaskan dan mendinginkan rumah serta kantor, serta digunakan dalam proses industri. Ada juga aplikasi baru yang mulai berkembang seperti penyimpanan energi panas bumi, di mana lapisan bawah tanah berfungsi sebagai "baterai alami", dan ekstraksi mineral penting dari panas bumi, untuk memperoleh unsur langka seperti litium. Diadaptasi dari Porse, S. (2021). *Tinjauan energi panas bumi dan peluang untuk kolaborasi*. Pertukaran energi.

PEMANFAATAN LANGSUNG: PEMANASAN, PENDINGINAN, DAN PROSES INDUSTRI DENGAN ENERGI PANAS BUMI

Sekitar tiga perempat dari seluruh energi panas yang digunakan manusia—mulai dari pemanasan dan pendinginan bangunan hingga proses industri—dihasilkan dengan membakar minyak, gas, dan batubara secara langsung.[14] Sisanya berasal dari sumber lain, seperti pembakaran biomassa, atau melalui elektrifikasi panas, yaitu listrik yang dihasilkan dari tenaga surya, angin, atau bahan bakar lain, kemudian diubah kembali menjadi panas (misalnya dengan pemanas listrik).



JENIS-JENIS PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI



Gambar 1.5: Ada tiga konfigurasi utama untuk menghasilkan listrik menggunakan energi panas bumi: siklus ganda (*binary*), uap kilat (*flash*), dan uap kering (*dry steam*). Secara umum, dengan teknologi baru saat ini, semakin panas sumber daya panas bumi di bawah tanah—baik dari sistem hidrotermal konvensional maupun panas bumi generasi baru—semakin efisien peralatan di permukaan dalam menghasilkan listrik. Pembangkit listrik panas bumi dengan sistem siklus ganda (*binary*) dapat beroperasi pada suhu fluida serendah sekitar 95°C. Sementara itu, turbin uap kilat (*flash*) dan uap kering (*dry steam*) digunakan ketika suhu fluida melebihi 182°C. Sumber: Beard, JC, & Jones, BA (Eds.). (2023). *Masa depan panas bumi di Texas: Abad pertumbuhan dan kemakmuran yang akan datang di Negara Bagian Lone Star*. Institut Energi, Universitas Texas di Austin.

Secara global, energi panas menyumbang sekitar setengah dari total konsumsi energi dunia dan menghasilkan sekitar 40% dari emisi terkait energi.[13] Dengan kata lain, energi panas bumi yang bersih berpotensi memenuhi hampir setengah dari kebutuhan energi dunia. Hingga saat ini, peluang besar ini hampir sepenuhnya terabaikan.

Di Indonesia, pemanasan dan pendinginan bangunan menyumbang sekitar 60% dari total konsumsi energi di sektor residensial dan komersial.[15] Kabar baiknya adalah bahwa teknologi panas bumi yang dapat membantu memenuhi permintaan ini sudah ada: pompa panas sumber tanah (*ground source heat pumps / geothermal heat pumps*; lihat **Gambar 1.6**), pendinginan distrik panas bumi (*geothermal district cooling*)—yaitu sistem pompa panas berskala besar yang saling terhubung, juga dikenal sebagai jaringan energi termal (*thermal energy networks / TENS*), serta pendingin absorpsi (*absorption chillers*)—(lihat bab tentang pemanfaatan langsung energi panas bumi dalam laporan ini untuk informasi lebih lanjut).

JARINGAN PENDINGINAN DAN PEMANASAN PANAS BUMI

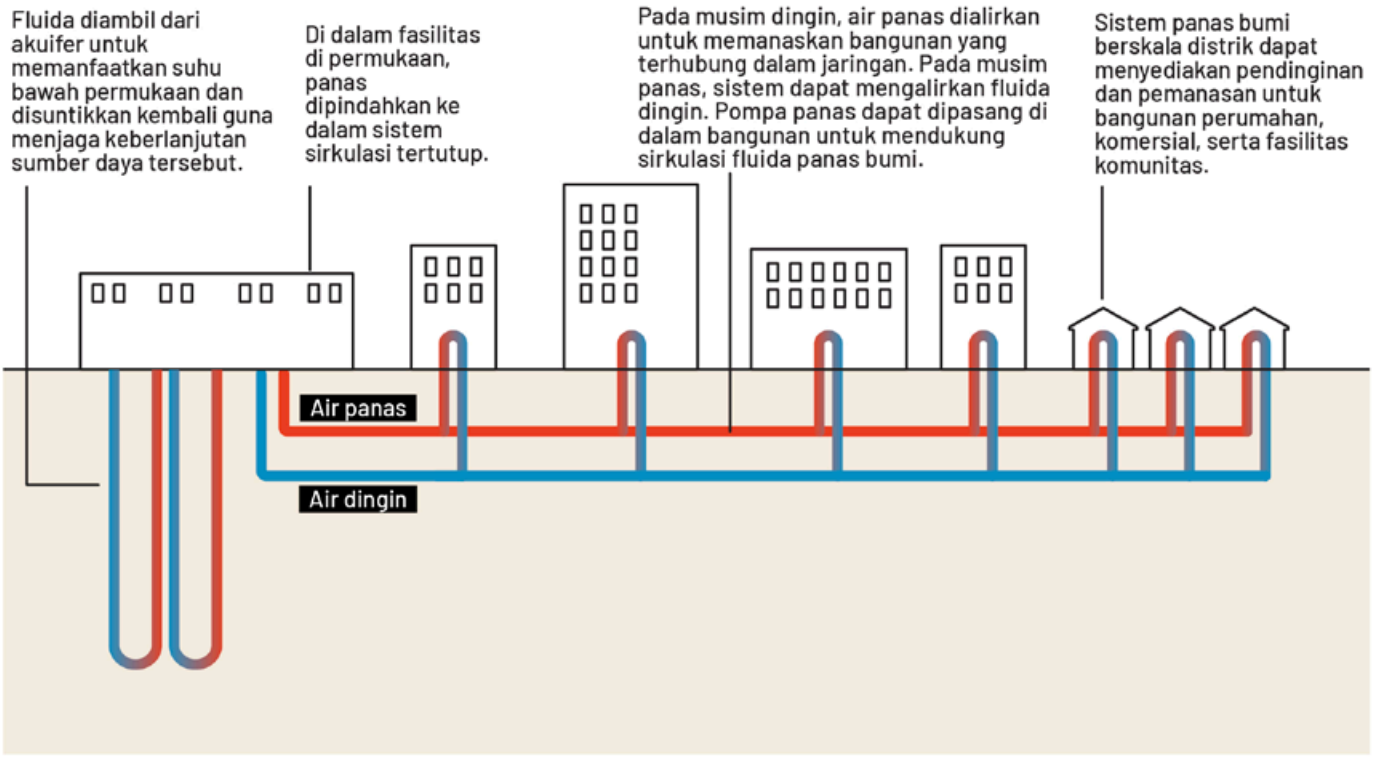


Figure 1.6: Fluida pada sistem pendinginan distrik biasanya dinaikkan ke permukaan dengan suhu target sekitar 21°C. Fluida tersebut kemudian dialirkan melalui pompa panas (*heat pump*) untuk menghasilkan air dingin pada musim panas dan air panas pada musim dingin. Jenis sistem pendinginan dan pemanasan seperti ini dapat lebih dari dua kali lipat lebih efisien dibandingkan sistem HVAC konvensional, karena beban termal dibagi antar bangunan yang terhubung dalam jaringan yang sama. Diadaptasi dari Departemen Energi AS. *Pemanasan & pendinginan distrik panas bumi*.

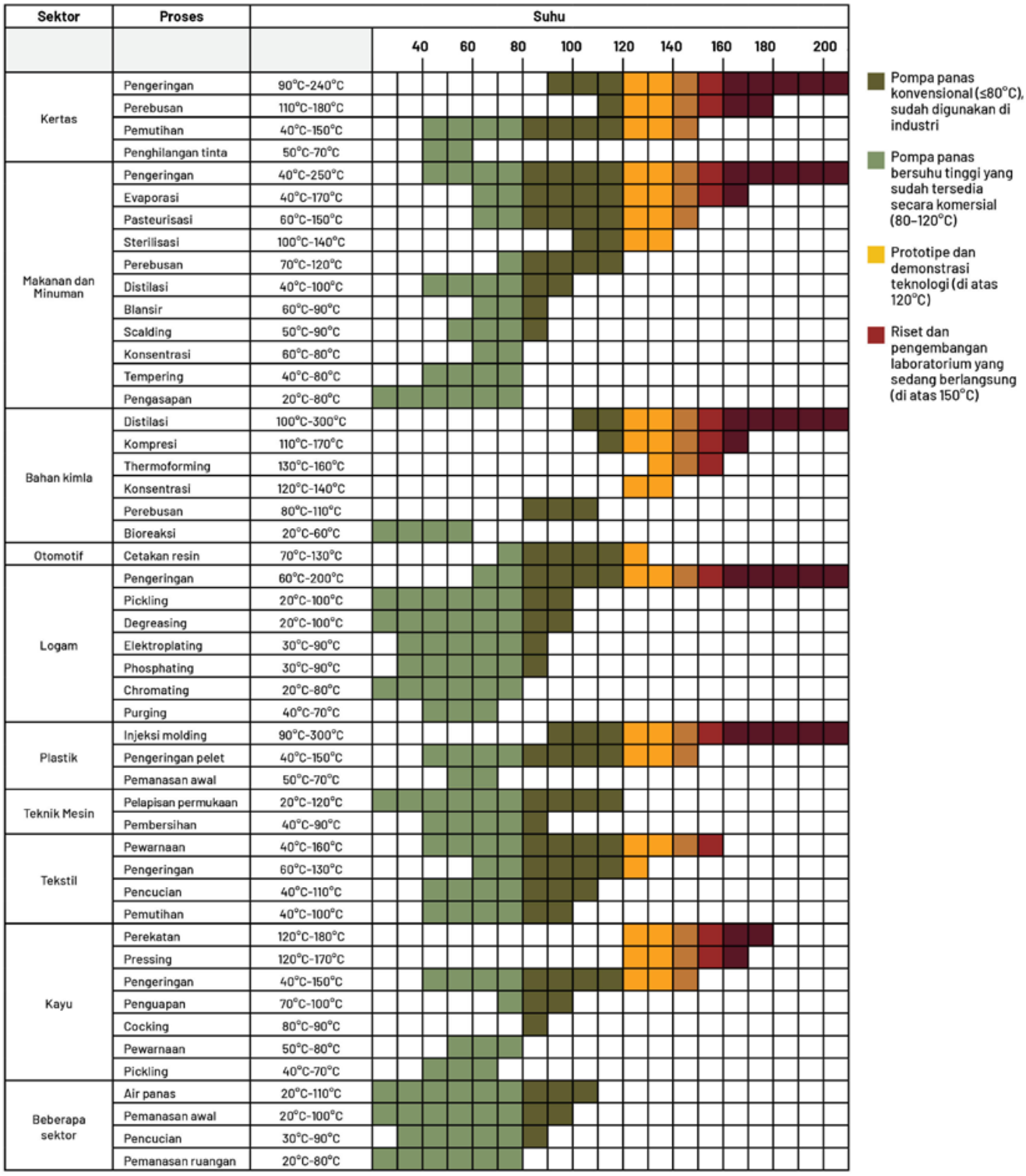
Panas proses industri digunakan untuk memproduksi berbagai barang — mulai dari pulpen hingga kertas, susu pasteurisasi hingga obat-obatan. Empat bahan paling penting dalam dunia modern — pupuk, semen, baja, dan plastik — semuanya membutuhkan jumlah panas yang besar dalam proses pembuatannya. Di sektor industri, energi panas (*thermal*) menyumbang lebih dari setengah total konsumsi energi dan menjadi penyumbang utama emisi sektor tersebut.[16]

Semua sistem pendinginan dan pemanasan bangunan (HVAC) serta 30% panas yang digunakan dalam proses manufaktur di seluruh dunia beroperasi pada suhu di bawah 150°C.[17] Di banyak wilayah dunia, panas bumi pada kisaran suhu ini memiliki biaya yang sebanding dengan sumber energi lain seperti batubara, biomassa, tenaga surya, dan angin. Laporan IEA memperkirakan bahwa panas bumi generasi baru secara ekonomis dapat memenuhi hingga 35% dari seluruh permintaan panas industri global untuk proses yang memerlukan suhu di bawah 200°C.

Pemanfaatan panas bumi generasi baru ini berpotensi menghemat sekitar 750 juta ton emisi karbon dioksida (CO_2) — setara dengan total emisi tahunan Kanada, negara penghasil emisi terbesar ke-12 di dunia.[18] **Gambar 1.7** memperlihatkan berbagai sektor dan proses industri yang dapat memanfaatkan panas bumi, baik dengan maupun tanpa pompa panas, tergantung pada kemampuan lokasi fasilitas untuk mencapai suhu panas yang diperlukan pada kedalaman bawah tanah yang wajar.

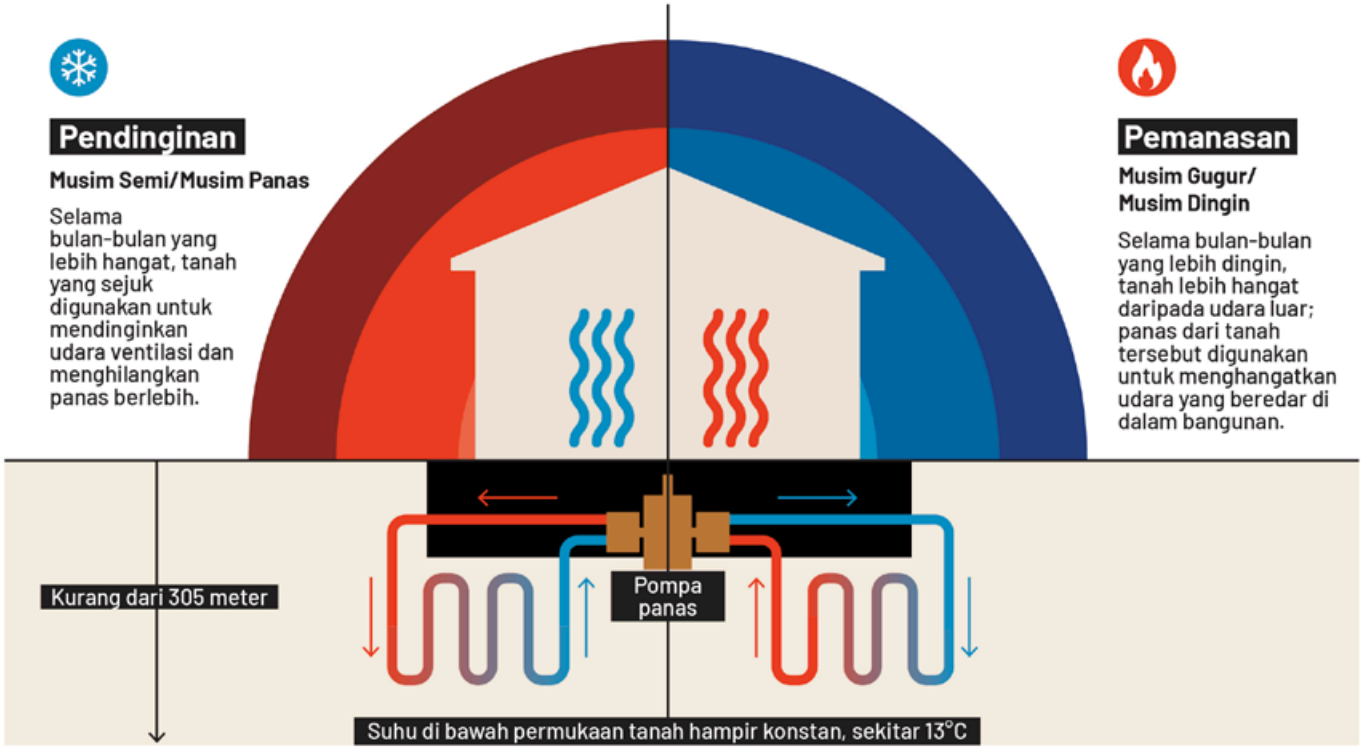
Selain untuk pengatur suhu ruangan, energi panas bumi juga dapat dimanfaatkan untuk refrigerasi dan pendinginan komersial, melalui teknologi yang dikenal sebagai pendingin absorpsi (*absorption chiller*). Pendingin absorpsi

SUHU PROSES INDUSTRI DAN TEKNOLOGI POMPA PANAS



Gambar 1.7: Perkiraan tingkat kesiapan teknologi (*technology readiness levels*) untuk pompa panas suhu tinggi per Juli 2023. Energi panas bumi dapat mendukung berbagai proses industri tanpa menggunakan pompa panas; namun, menggabungkan kedua teknologi tersebut dapat memberikan manfaat yang lebih besar. Dalam beberapa tahun terakhir, pompa panas industri bersuhu tinggi di atas 100°C telah mengalami kemajuan signifikan dalam pengembangannya.. Sumber: Arpagaus, C., et al. (2023). *Pompa panas industri: Kesiapan teknologi, kondisi ekonomi, dan refrigeran berkelanjutan*. Dewan Amerika untuk Ekonomi Hemat Energi (ACEEE).

PENDINGINAN DAN PEMANASAN DENGAN POMPA PANAS SUMBER TANAH



Gambar 1.8: Suhu tanah yang relatif konstan membantu meningkatkan efisiensi pompa panas sumber tanah (ground source heat pumps) dibandingkan dengan metode HVAC lainnya. Sumber: Beard, JC, & Jones, BA (Eds.). (2023). *Masa depan panas bumi di Texas: Abad pertumbuhan dan kemakmuran yang akan datang di Negara Bagian Lone Star*. Institut Energi, Universitas Texas di Austin.

adalah sistem pendingin yang menggunakan panas (alih-alih listrik) untuk menjalankan proses pendinginan.

Seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 1.9**, amonia cair bertekanan rendah menyerap panas dari ruang penyimpanan dingin atau ruang ber-AC, sehingga amonia berubah menjadi uap bertekanan rendah. Uap ini kemudian diserap oleh air, membentuk larutan amonia-air, yang kemudian dipompa ke generator. Di dalam generator, panas bumi digunakan untuk memanaskan larutan bertekanan tersebut, menghasilkan uap amonia bertekanan tinggi. Uap ini melepaskan panasnya di menara pendingin, mengembun kembali menjadi amonia cair bertekanan rendah, dan siklus pendinginan pun berulang kembali.

Dengan memanfaatkan panas bumi seperti ini, pendingin absorpsi dapat memberikan pendinginan tanpa memerlukan kompresor listrik konvensional atau pembakaran bahan bakar fosil. Bagi Indonesia, di mana sistem pendinginan menyumbang sekitar 40–60% dari konsumsi listrik di kota-kota besar,[19] teknologi pendingin absorpsi panas bumi menawarkan solusi berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan refrigerasi dan pendingin udara, sekaligus mengurangi beban jaringan listrik dan menekan emisi gas rumah kaca.

PENYIMPANAN ENERGI PANAS BUMI (GEOTHERMAL ENERGY STORAGE / GES)

Jaringan listrik modern adalah sistem yang rumit dan sangat penting, yang memerlukan pemantauan terus-menerus untuk menjaga keseimbangan antara produksi listrik dan permintaan listrik. Dengan semakin banyaknya aliran listrik dari sumber energi intermiten seperti angin dan surya—yang hanya tersedia saat matahari bersinar atau angin bertiup—muncul kekhawatiran mengenai ketersediaan energi saat dibutuhkan, sehingga kebutuhan akan teknologi penyimpanan energi menjadi

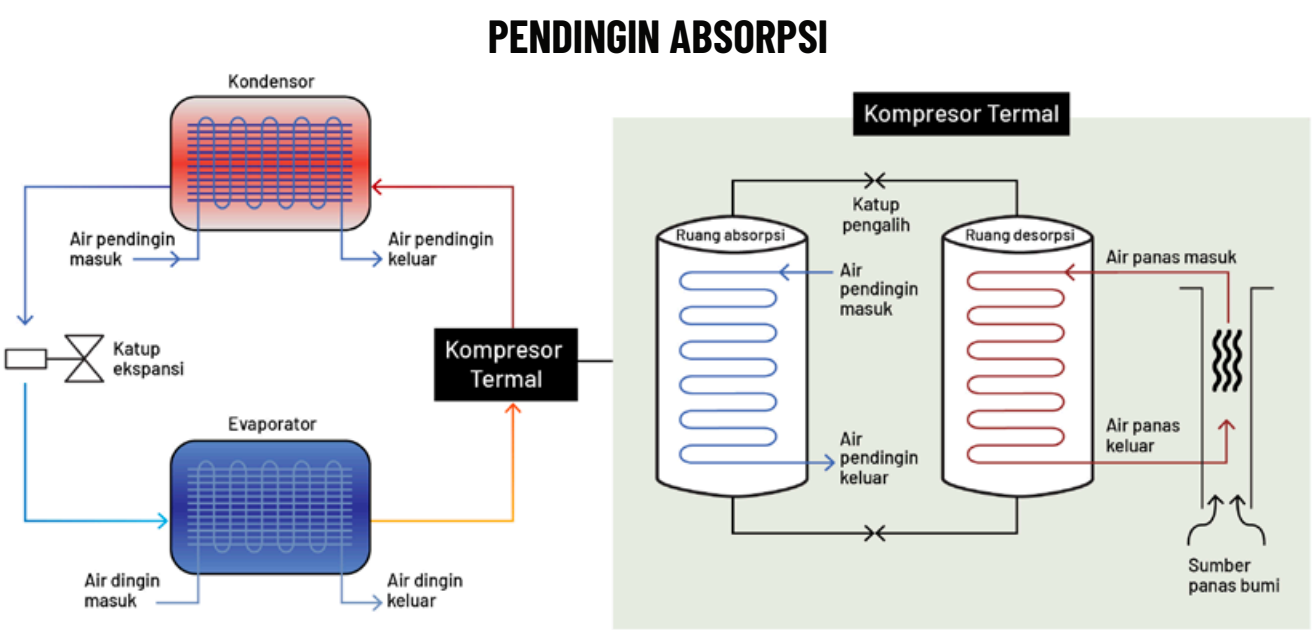
semakin mendesak.[20] Saat ini, penyimpanan energi hidroelektrik menyumbang sebagian besar kapasitas penyimpanan energi global.[21] Dalam beberapa tahun terakhir, terjadi peningkatan pesat penggunaan baterai untuk penyimpanan energi. Namun, pendekatan baru yang dikenal sebagai penyimpanan energi panas bumi bawah tanah (*Underground Thermal Energy Storage*), atau *Geothermal Energy Storage* (GES), menawarkan alternatif tambahan yang menjanjikan.

Sistem GES menangkap dan menyimpan panas buangan atau kelebihan listrik dengan memompa fluida ke dalam ruang penyimpanan bawah tanah, baik alami maupun buatan (misalnya akuifer, lubang bor, atau tambang). GES dapat bersifat mekanis murni, menggunakan teknik rekahan hidrolik (*hydraulic fracturing*) untuk menyimpan fluida bertekanan di reservoir bawah tanah. Atau dapat bersifat mekanis sekaligus termal, dengan mengombinasikan tekanan dan panas, sehingga dapat menghasilkan kembali energi dalam jumlah yang lebih besar daripada energi yang digunakan untuk memompa fluida ke bawah tanah.

EKSTRAKSI MINERAL KRITIS

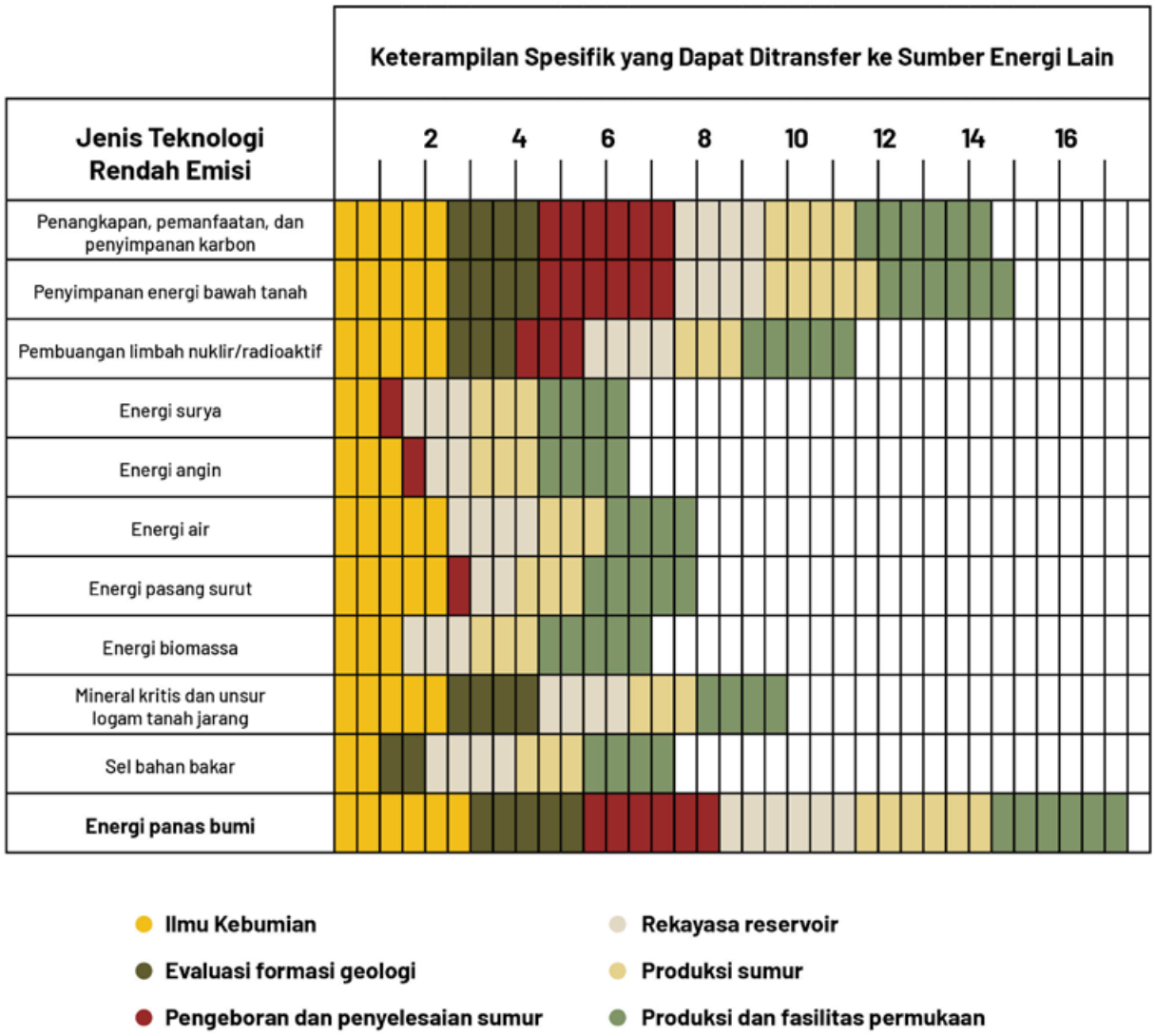
Dalam sistem panas bumi, fluida atau air garam (*brine*) sering kali dihasilkan sebagai bagian dari proses produksi energi. Air garam ini kaya akan mineral terlarut, termasuk litium, yang dapat diekstraksi untuk memenuhi permintaan global yang meningkat terhadap baterai litium-ion, terutama untuk kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi jaringan listrik. Pendekatan ganda ini — menghasilkan energi bersih sekaligus menyediakan sumber litium domestik — berpotensi mengurangi dampak lingkungan dari penambangan litium tradisional serta meningkatkan nilai ekonomi proyek panas bumi.

Di Lapangan Panas Bumi Dieng, Jawa Tengah, air garam panas bumi memiliki kandungan garam sedang hingga tinggi, serta mengandung litium dan mineral terlarut lainnya dalam kadar yang terukur. Secara tradisional, kandungan mineral ini dianggap sebagai tantangan operasional, karena dapat menyebabkan pengendapan mineral dan kerak (*scaling*) yang menghambat aliran fluida dan merusak infrastruktur. Namun saat ini, teknologi ekstraksi litium langsung (*direct lithium extraction*) membuka peluang baru di mana mineral-mineral penting tersebut dapat diekstraksi dan dijual, sehingga menambah sumber pendapatan bagi operator pembangkit listrik panas bumi. Sebuah proyek percontohan yang dipimpin oleh PT Geo Dipa Energi sedang meneliti kelayakan ekstraksi litium dari air garam panas bumi Dieng. Perkiraan awal menunjukkan bahwa reservoir tersebut berpotensi menghasilkan hingga 2.200 ton litium per tahun.[22]



Gambar 1.9: Aliran dan keseimbangan energi pada sistem pendingin absorpsi. Sumber: Dimodifikasi dari Ebrahimi, M., & Keshavarz, A. (2015). *Teknologi CCHP*. Dalam *Pendinginan, pemanasan dan daya gabungan: Pengambilan keputusan, desain dan pengoptimalan* (hlm. 35–91). Elsevier.

KETERAMPILAN YANG DAPAT DIALIHKAN DARI INDUSTRI MINYAK DAN GAS



Gambar 1.10: Seperti yang ditunjukkan, energi panas bumi menempati peringkat tertinggi dalam hal potensi pemanfaatan keterampilan dari sektor minyak dan gas ke dalam teknologi transisi energi dan rendah karbon lainnya. Sumber: Tayyib, D., Ekeoma, PI, Offor, CP, Adetula, O., Okoroafor, J., Egbe, TI, & Okoroafor, ER (2023). *Keterampilan minyak dan gas untuk teknologi energi rendah karbon*. Konferensi dan Pameran Teknis Tahunan Society of Petroleum Engineers.

Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1.11**, kerak bumi menyimpan potensi energi panas yang jauh lebih besar dibandingkan dengan seluruh gabungan energi fosil dan bahan fisi nuklir alami. Tantangannya kini adalah bagaimana mengidentifikasi wilayah dan teknologi yang mampu memanfaatkan potensi energi tersebut secara paling efisien dan ekonomis.

Gambar 1.13 merangkum teknologi terbaru dalam ekstraksi energi panas bumi. Bagian-bagian berikut menjelaskan teknologi tersebut secara lebih rinci.

Sistem Panas Bumi Lanjutan (Advanced Geothermal System / AGS): Seperti halnya Sistem Panas Bumi Rekayasa (Engineered Geothermal System / EGS), sistem AGS menghilangkan kebutuhan akan batuan bawah permukaan yang permeabel. Sebagai gantinya, AGS membangun dan menggunakan jaringan pipa dan sumur tertutup yang sepenuhnya terpisah dari lingkungan bawah tanah, dengan fluida yang bersirkulasi sepenuhnya di dalam sistem tertutup (*closed loop*).

Saat ini, banyak desain sumur panas bumi berbasis AGS sedang dikembangkan, termasuk sumur tunggal, sumur berbentuk U ("doublet") dengan sumur injeksi dan produksi, serta desain radiator bawah tanah. Semua desain ini hanya menggunakan jalur pengeborannya sendiri, tanpa membutuhkan sumber daya hidrotermal konvensional atau rekahan hidrolik (*hydraulic fracturing*) untuk menciptakan jalur fluida.

Seluruh ekstraksi energi panas bumi bergantung pada konduksi, yaitu perpindahan panas dari batuan panas ke fluida (lihat bagian "Geothermal Geology and Heat Flow" untuk penjelasan lebih lanjut). Berbeda dengan EGS, yang diuntungkan oleh luas permukaan besar hasil rekahan hidrolik, AGS hanya memiliki dinding sumur bor sebagai area konduksi panas. Oleh karena itu, sistem AGS perlu mengebor lebih dalam, lebih panas, atau lebih panjang dibandingkan EGS untuk dapat menghantarkan jumlah panas yang setara. Karena AGS tidak bertukar fluida dengan bawah permukaan, sistem ini dapat lebih mudah menggunakan fluida kerja hasil rekayasa non-air, seperti CO_2 superkritis. Seiring dengan kemajuan teknologi, AGS kini juga mulai dikembangkan untuk proyek berskala industri. Sebagai contoh, XGS Energy dan Meta (Facebook) baru-baru ini bekerja sama membangun pembangkit listrik AGS berkapasitas 150 megawatt pertama di dunia di Amerika Serikat, yang akan memanfaatkan batuan panas sekitar 250°C untuk memasok energi bagi pusat data di New Mexico.[23]

AGS dapat dikembangkan di hampir semua kondisi geologi yang memiliki panas bawah permukaan yang memadai. Namun, meskipun AGS menawarkan jalur sirkulasi fluida yang lebih pasti dibandingkan dengan sumur EGS yang direkahkan, pengeboran sumur AGS yang cukup panjang dan dalam dapat menjadi tantangan teknis sekaligus mahal secara ekonomi.

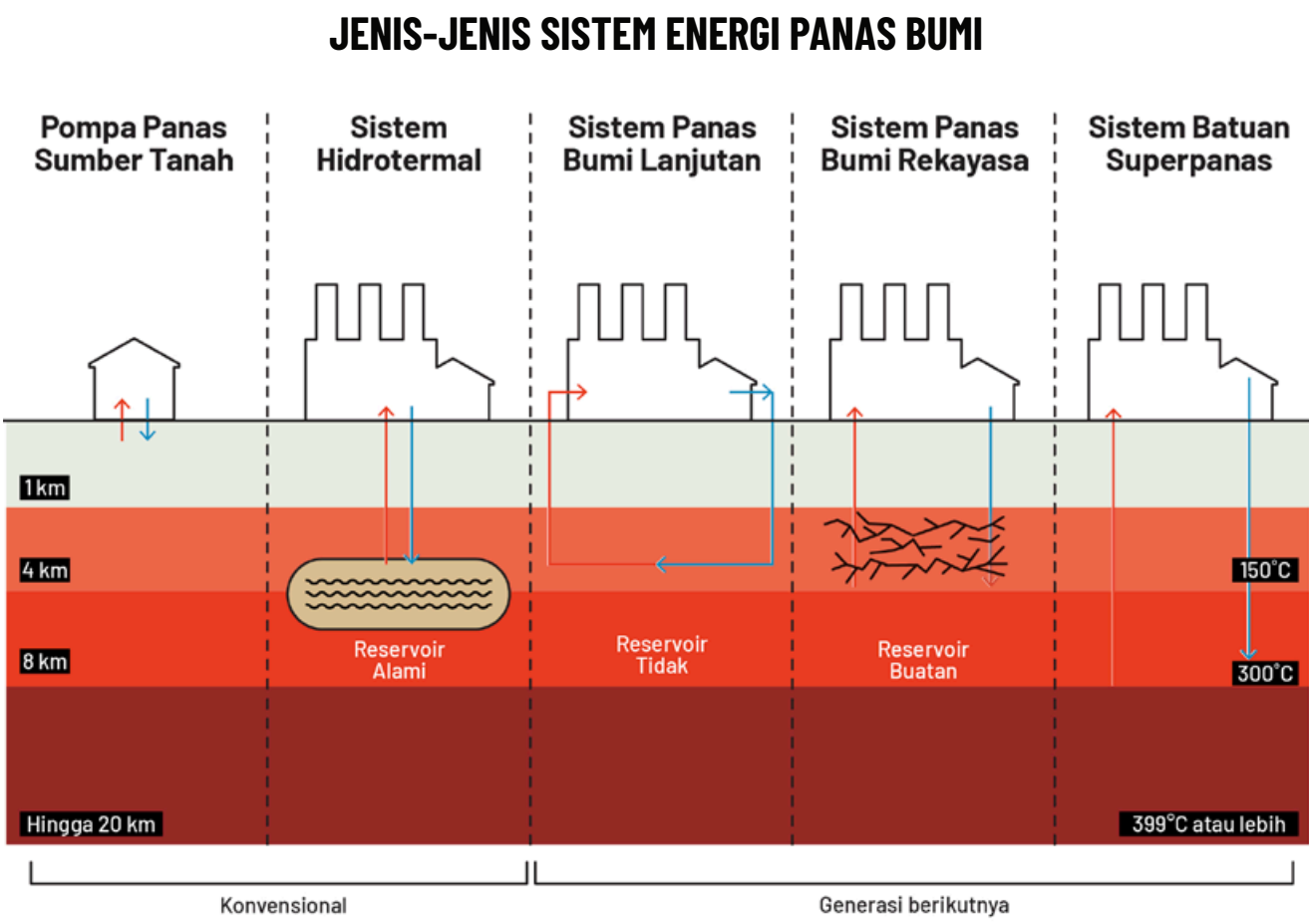
Sistem Panas Bumi Rekayasa (Engineered Geothermal System / EGS): Sistem ini menggunakan pengeboran terarah (*directional drilling*) dan rekahan hidrolik (*hydraulic fracturing*) untuk menciptakan permeabilitas buatan, memungkinkan pemanfaatan energi panas bumi di luar wilayah yang memiliki sumber daya hidrotermal alami. EGS mengekstraksi panas dengan menginjeksikan fluida ke bawah permukaan, membuka celah-celah pada batuan yang relatif tidak permeabel, dan mengalirkan fluida antara satu atau lebih sumur. Semakin banyak rekahan yang terbentuk, semakin luas permukaan batuan yang bersentuhan dengan fluida, sehingga transfer panas menjadi lebih efisien.



Gambar 1.11: Perbandingan total energi panas di kerak bumi dengan bahan fisi nuklir dan bahan bakar fosil. Perlu dicatat bahwa total energi dari bahan bakar fosil, jika dibandingkan dengan energi panas di kerak bumi, setara dengan kurang dari satu piksel di bagian bawah grafik (diperbesar hanya untuk menunjukkan skala perbandingan). Satuan pengukuran digunakan dalam zettajoule (ZJ). Sumber: Beard, JC, & Jones, BA (Eds.). (2023). *Masa depan panas bumi di Texas: Abad pertumbuhan dan kemakmuran yang akan datang di Negara Bagian Lone Star*. Institut Energi, Universitas Texas di Austin. Diadaptasi dari Dourado, E. (2021). *Keadaan energi panas bumi generasi berikutnya*.

Meskipun konsep EGS sudah diperkenalkan sejak tahun 1970-an,[24] penerapannya secara luas baru dimungkinkan berkat penurunan biaya dan kemajuan teknologi pengeboran serta rekahan yang dikembangkan oleh industri minyak dan gas dalam beberapa dekade terakhir. Namun berbeda dengan sumur minyak dan gas hasil rekahan hidrolik — yang hanya dirancang untuk ekstraksi satu arah — EGS justru dirancang untuk menggunakan kembali fluida secara berulang, sehingga cairan yang sama mengalir terus-menerus melalui batuan panas dalam siklus konveksi tertutup.

EGS umumnya menargetkan formasi batuan panas dangkal yang memiliki sedikit rekahan alami dan permeabilitas rendah, untuk meminimalkan kehilangan fluida yang tidak terkendali. Kedalaman sumur dapat bervariasi tergantung



Gambar 1.12: Kecuali untuk pompa panas sumber tanah (ground source heat pumps/GSHP), grafik ini secara umum menunjukkan pembangkitan listrik panas bumi dan penggunaan langsung untuk industri. GSHP menggambarkan sistem pemanas bangunan; arah panah dan aliran fluida akan berbalik saat sistem digunakan untuk pendinginan bangunan.. Sumber: Diadaptasi dari D'avack, F., & Omar, M. (2024). *Infografis: Teknologi generasi berikutnya mengatur adegan untuk pertumbuhan panas bumi yang dipercepat*. S&P Global.

pada lokasi di mana suhu yang cukup tinggi dan kondisi tekanan yang sesuai ditemukan.[25]

Metode rekahan memiliki tingkat ketidakpastian tertentu; bahkan model rekayasa paling akurat sekalipun tidak dapat sepenuhnya memprediksi bagaimana batuan bawah tanah akan retak atau bagaimana fluida akan mengalir. Karena lokasi Indonesia berada di sepanjang Lengkungan Sunda yang aktif secara vulkanik, Indonesia sudah menampung sumber daya hidrotermal entalpi tinggi yang melimpah dengan permeabilitas alami.[26] Dalam konteks ini, EGS kurang cocok untuk jangka pendek, sementara skala percontohan hidrotermal dan AGS akan lebih sesuai dengan pertimbangan geologi dan masyarakat Indonesia.

Sistem Batuan Superpanas (Superhot Rock / SHR): SHR merupakan jenis panas bumi generasi baru yang menargetkan batuan sangat dalam dengan tekanan tinggi, bersuhu di atas 373°C, yaitu suhu ketika air mencapai kondisi superkritis. SHR memiliki potensi untuk merevolusi pembangkitan listrik secara global, karena uap superpanas dan superkritis mampu mentransfer panas dengan efisiensi yang sangat tinggi dari bawah permukaan bumi. Secara teoritis, SHR dapat menggunakan teknologi sumur EGS atau AGS. Namun hingga kini, belum ada proyek panas bumi SHR komersial yang beroperasi, karena masih dibutuhkan kemajuan besar dalam teknologi pengeboran, kecepatan operasi, dan efisiensi biaya agar memungkinkan pengembangan konsep generasi berikutnya yang kompetitif secara ekonomi.[27]

GEOLOGI PANAS BUMI DAN ALIRAN PANAS

Pergerakan panas dari bagian dalam bumi yang panas menuju permukaan — yang disebut oleh ahli geologi sebagai *heat flow* (aliran panas) — dikendalikan oleh kondisi geologi planet. Panas yang berasal dari inti dan mantel bumi, serta hasil peluruhan endapan radioaktif alami di kerak bumi, berpadu dan mengalir menuju permukaan.

Konduksi, Adveksi, Konveksi, dan Radiasi

Aliran panas di dalam bumi dihasilkan dari proses fisik yang berkontribusi, dengan derajat yang berbeda, terhadap panas yang tersedia dalam sumber daya panas bumi.

- **Konduksi:** Pemindahan energi antara benda yang bersentuhan secara fisik melalui getaran molekul, tanpa perpindahan massa. Konduksi efisien pada beberapa bahan (seperti logam) dan kurang efisien pada bahan lain. Batu adalah konduktor panas yang relatif buruk, tetapi proses konduksi tetap signifikan di bagian dalam bumi.

- **Adveksi:** Pemindahan panas yang disebabkan oleh pergerakan cairan dari satu lokasi ke lokasi lain. Dalam konteks geologi, adveksi terjadi melalui pergerakan magma dan air tanah, di mana fluida membawa panas saat bergerak melalui retakan, celah, dan formasi batuan berpori. Adveksi berbeda dari konduksi karena tidak mengandalkan kontak langsung antarpartikel, melainkan perpindahan massa fluida.

- **Konveksi:** Siklus perpindahan panas yang melibatkan konduksi dan adveksi, terjadi ketika materi dipanaskan, menjadi kurang padat dan naik, kemudian mendingin, menjadi lebih padat, dan tenggelam kembali. Proses ini menciptakan sirkulasi naik-turun yang berulang. Mantel bumi sebagian besar bersifat padat, tetapi berperilaku seperti fluida sangat kental, sehingga memungkinkan terjadinya perpindahan panas secara konvektif. Pergerakan mantel ini sangat lambat dalam skala waktu manusia, tetapi signifikan dalam skala geologis.

- **Radiasi:** Energi berpindah dari satu tempat ke tempat lain dalam bentuk gelombang atau partikel. Beberapa bagian kerak bumi memiliki konsentrasi tinggi unsur-unsur radioaktif alami seperti uranium-238, uranium-235, torium-232, dan kalium-40, yang turut menghasilkan panas melalui radiasi.

Geologi dan Ekstraksi Energi

Proses-proses geologi di atas saling berinteraksi dan berkontribusi terhadap ekstraksi energi panas bumi dalam tiga pengaturan geologi utama:

Didominasi Konveksi

1. Sistem panas bumi terbuka secara geologis: Air dapat bersirkulasi bebas di dalam sistem (contohnya: Great Basin di Amerika Serikat). Sistem seperti ini biasanya digunakan untuk pembangkit listrik panas bumi atau sistem pemanas dengan sirkulasi terbuka.

Didominasi Konduksi

2. Sistem Tertutup dengan Porositas/Permeabilitas Terbatas: Dalam sistem ini, air tidak mengalir secara alami. Untuk mengekstraksi energi panas bumi, diperlukan rekayasa tambahan seperti rekahan hidrolik (*hydraulic fracturing*).

3. Sistem Tertutup dengan Porositas/Permeabilitas Alami: Sistem ini memiliki ruang pori alami hingga kedalaman tertentu yang memungkinkan sebagian aliran fluida. Kondisi ini bermanfaat terutama untuk penyimpanan energi panas yang digunakan dalam sistem pemanasan dan pendinginan.



Geografi, Aplikasi, dan Teknologi yang Sudah Ada			
	Panas Bumi Hidrotermal Konvensional	**Pemanas Distrik**	**Pompa Panas Sumber-Tanah**
Konsep Dasar	Bergantung pada sistem hidrotermal alami dengan air panas dan batuan berpori	Menyediakan pemanas melalui jaringan bangunan yang saling terhubung, memakai sistem panas bumi terpusat	Memanfaatkan kestabilan suhu tanah dangkal untuk memanaskan dan mendinginkan bangunan
Fluida Kerja	Fluida yang terjadi secara alami	Air atau uap yang disirkulasikan melalui pipa terpusat ke bangunan	Umumnya air atau antibeku/ refrigeran dalam sistem tertutup
Jenis Reservoir	Terbuka ke reservoir hidrotermal alami	Reservoir terpusat yang memasok bangunan dengan air panas atau uap	Sistem loop tertutup yang ditanam pada kedalaman dangkal
Persyaratan Geologis	Akuifer panas alami pada formasi batuan berpori	Umumnya akuifer sedimen; juga bisa memakai sistem panas bumi konvensional seperti di Islandia	Tidak memerlukan geologi khusus; cocok hampir di semua lokasi
Rentang Suhu	150°C - 350°C	Umumnya sekitar 80°C – 100°C	Semua rentang (tergantung desain)
Kedalaman Pengeboran	Dangkal atau dalam, tergantung lokasi hidrotermal	Dangkal hingga menengah, sesuai kebutuhan suhu	Sangat dangkal (±3–152 m untuk residensial) hingga lebih dalam untuk industri
Skalabilitas	Terbatas pada wilayah dengan kondisi hidrotermal alami	Dapat diskalakan di area padat bangunan yang bisa berbagi jaringan air panas/uap	Sangat dapat diskalakan; bisa dipasang hampir di mana saja
Dampak Lingkungan	Lebih rendah, tetapi bergantung pada kondisi sumber daya alam	Dampak rendah; pengeboran minimal dan emisi rendah	Dampak minimal; sistem tertutup tanpa interaksi bawah permukaan
Contoh Penggunaan	PLTP konvensional; pemanas langsung di wilayah dengan kondisi hidrotermal	District heating geotermal di Islandia, Paris, dan beberapa kota di AS	Umum untuk pemanasan–pendinginan bangunan residensial & komersial; meningkat untuk industri (termasuk pendinginan pusat data)
Keunggulan Utama	Teknologi matang di area yang memiliki sumber daya hidrotermal	Pemanasan efisien dan hemat biaya untuk banyak bangunan dalam jaringan urban/suburban	Sistem andal untuk pengendalian iklim sepanjang tahun; teknologi kunci untuk pendinginan pusat data
Tantangan	Terbatas secara geografis pada area dengan kondisi alami spesifik	Biaya awal tinggi; butuh infrastruktur untuk menghubungkan banyak bangunan	Biaya awal lebih tinggi dibanding HVAC konvensional

Gambar 1.13: Existing and new geographies, applications, and technologies.



Geografi, Aplikasi, dan Teknologi Baru			
	Batuan Superpanas	**Sistem Panas Bumi Sedimenter**	**Sistem Panas Bumi Rekayasa**
Konsep Dasar	Memanfaatkan suhu sangat tinggi di kedalaman ekstrem	Memanfaatkan formasi batuan sedimen yang mungkin mengandung air panas di pori-porinya; dapat melibatkan batuan berpori rendah	Menggunakan rekahan hidrolik (hydraulic fracturing) untuk menciptakan permeabilitas buatan guna penyerapan panas
Fluida Kerja	Air, berpotensi mencapai kondisi superkritis	Umumnya air dari akuifer di batuan sedimen; mungkin memerlukan sirkulasi pompa	Mengalirkan kembali fluida (air atau lainnya) melalui rekahan di batuan panas
Jenis Reservoir	Terbuka, menargetkan batuan superpanas	Terbuka, dengan batuan berpori alami dan permeabel yang berfungsi sebagai reservoir untuk aliran fluida	Terbuka ke reservoir dengan rekahan hasil rekayasa
Persyaratan Geologis	Suhu tinggi (di atas 373°C)	Formasi batuan sedimen dengan tingkat porositas dan permeabilitas tertentu untuk aliran air	Memerlukan panas dan permeabilitas hasil rekayasa; diuntungkan oleh area batuan panas dekat permukaan
Rentang Suhu	≥373°C (menargetkan uap superkritis)	Dapat bervariasi (dari suhu rendah ~20°C hingga >200°C)	Umumnya 50°C–300°C
Kedalaman Pengeboran	Kedalaman signifikan (berpotensi >10 kilometer)	Bervariasi, antara 500 meter hingga 8.000 meter	Umumnya <3.000 meter; pengeboran bertekanan tinggi dan dalam dapat menambah biaya
Skalabilitas	Berpotensi dapat ditingkatkan dengan teknologi pengeboran dalam yang lebih baik	Dapat diskalakan; 73% daratan benua mengandung cekungan batuan sedimen	Dapat ditingkatkan dengan kemajuan teknologi fracturing dan pengeboran; tetapi terbatas pada area dengan batuan panas dangkal (<3.000 meter) tanpa rekahan alami
Dampak Lingkungan	Dampak tinggi akibat pengeboran; memerlukan peningkatan teknologi agar layak	Umumnya rendah	Dapat menyebabkan seismisitas terinduksi tergantung kondisi geologi; penggunaan air cukup tinggi meski fluida kerja digunakan kembali
Contoh Penggunaan	Eksperimen; belum ada penerapan skala besar	Aplikasi panas untuk rumah tangga dan industri: Southampton (Inggris), Paris	Proyek FORGE dari Departemen Energi AS, Proyek Red Fervo di Utah
Keunggulan Utama	Efisiensi tinggi dalam pembangkitan listrik melalui uap superkritis	Efisien dan dapat diskalakan, terutama di cekungan yang sudah banyak dieksplorasi; sistem akuifer berlapis dapat mendukung berbagai tingkat panas bumi dari suhu rendah hingga tinggi serta penyimpanan energi panas bumi	Membuka potensi panas bumi di formasi batuan yang tidak ideal dengan menciptakan permeabilitas buatan



Geografi, Aplikasi, dan Teknologi Baru			
	Batuan Superpanas	**Sistem Panas Bumi Sedimenter**	**Sistem Panas Bumi Rekayasa**
Konsep Dasar	Sistem tertutup tanpa pertukaran fluida dengan lapisan bawah tanah	Menggunakan suhu tanah atau bawah permukaan untuk memberikan pendinginan di bangunan atau proses industri	Menyimpan energi panas di reservoir bawah tanah untuk digunakan kembali dalam pemanasan, pendinginan, atau pembangkitan listrik
Fluida Kerja	Mengalirkan fluida (air, CO_2 superkritis, atau lainnya) sepenuhnya dalam sistem tertutup dan terencana	Air atau refrigeran bersirkulasi untuk mentransfer suhu dingin ke bangunan	Air atau fluida penghantar panas lainnya untuk penyimpanan panas; pemulihan optimal pada reservoir bertekanan
Jenis Reservoir	Tertutup terhadap reservoir; menggunakan pipa tertutup dan jalur rekayasa	Tertutup atau terbuka dengan pipa di tanah dangkal yang memanfaatkan pendinginan tanah	Reservoir bawah tanah tertutup atau akuifer untuk penyimpanan energi, menggunakan jalur alami atau rekayasa
Persyaratan Geologis	Tidak memerlukan permeabilitas; berfungsi di mana pun ada ketersediaan panas	Umumnya tidak memerlukan persyaratan khusus; cocok untuk sebagian besar tanah dangkal dengan suhu stabil	Memerlukan ruang bawah tanah dengan retensi tekanan yang memadai untuk penyimpanan panas dan energi
Rentang Suhu	Bervariasi; biasanya membutuhkan batuan panas >100°C untuk penyerapan panas yang kompetitif	Memanfaatkan suhu alami tanah (~13°C) untuk pendinginan, serta suhu dalam tanah yang lebih dalam dengan teknologi pendinginan absorpsi	Fleksibel; dapat disesuaikan untuk penyimpanan panas musiman atau pengiriman energi bersuhu tinggi
Kedalaman Pengeboran	Berpotensi lebih dalam untuk mengakses panas tinggi, tetapi terbatas oleh area permukaan yang tersedia untuk transfer panas konduktif	Umumnya dangkal, antara 3–152 meter, karena pendinginan memerlukan suhu lebih rendah; lebih dalam >100°C dengan teknologi pendinginan absorpsi	Bervariasi; dapat dangkal untuk penyimpanan musiman atau dalam untuk penyimpanan suhu tinggi
Skalabilitas	Dapat ditingkatkan; sistem tidak tergantung pada permeabilitas bawah permukaan	Dapat ditingkatkan untuk aplikasi residensial, komersial, dan industri	Dapat ditingkatkan; cocok untuk integrasi dengan sumber energi terbarukan untuk penyimpanan energi
Dampak Lingkungan	Dampak rendah; sistem tertutup tanpa interaksi dengan batuan sekitar	Dampak minimal; sistem tertutup mencegah kontaminasi tanah	Dampak rendah; bergantung pada manajemen tekanan untuk penyimpanan panas yang aman
Contoh Penggunaan	Berbagai desain sistem tertutup dalam pengembangan, seperti Eavor-Loop dan GreenFire Energy's GreenLoop	ADNOC bekerja sama dengan National Central Cooling Company PJSC (Tabreed) menginisiasi operasi di G2COOL, Masdar City, Abu Dhabi	Penyimpanan energi panas bawah tanah, penyimpanan energi panas lubang bor, dan penyimpanan energi panas akuifer
Keunggulan Utama	Tidak ada pertukaran fluida dengan bawah permukaan; cocok untuk area tanpa akuifer alami	Pendinginan hemat biaya di wilayah dengan permintaan pendinginan tinggi; menurunkan biaya HVAC; dapat digunakan untuk mengoptimalkan pendinginan data center	Menyediakan penyimpanan energi untuk menyeimbangkan energi terbarukan dan mendukung stabilitas jaringan listrik
Challenges	Biaya pengeboran tinggi; area transfer panas terbatas dibandingkan dengan sistem panas bumi yang ditingkatkan (EGS); membutuhkan lebih banyak sumur untuk penyerapan panas	Biaya instalasi dan awal; memerlukan area tanah yang sesuai untuk pemasangan	Memerlukan kondisi geologis tertentu untuk pengendalian tekanan; biaya pengeboran bisa tinggi



REFERENSI

1 Unwin, J. (2019, 8 Oktober). Pembangkit listrik tenaga panas bumi tertua di dunia. *Teknologi Daya*. https://www.power-technology.com/features/oldest-geothermal-plant-larderello/. Listrik panas bumi digunakan pada awal tahun 1960 di Amerika Serikat. Lihat Rafferty, K. (2000, Januari). *Pembangkit listrik panas bumi: Primer untuk aplikasi skala kecil suhu rendah*. Pusat Geo-Panas. https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/894040#

2 Laboratorium Energi Terbarukan Nasional. (2017). *Dasar teknologi tahunan: Panas bumi*. https://atb-archive.nrel.gov/electricity/2017/index.html?t=gt&s=ov

3 Datta, A. (2023). *Batuan panas: Mengkomersialkan energi panas bumi generasi berikutnya*. Institut untuk Kemajuan. https://ifp.org/hot-rocks-commercializing-next-generation-geothermal-energy/

4 Badan Energi Terbarukan Internasional (IRENA) & Asosiasi Panas Bumi Internasional (IGA). (2023). *Panas bumi global: Penilaian pasar dan teknologi*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Global_geothermal_market_technology_assessment_2023.pdf

5 Cariaga, C. (2025, 20 Januari). *100 negara panas bumi teratas ThinkGeoEnergy 2024–power*. PikirkanGeoEnergi. https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2024-power/

6 Suryadarma, Dwikorianto, T., Zuhro, A. A.., & Yani, A. (2010). Pengembangan berkelanjutan lapangan panas bumi Kamojang. *Panas bumi, 39*(4), 391–399. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.09.006

7 Data Global. (2024). *Kapasitas tenaga panas bumi di Indonesia dan proyek-proyek besar.* Teknologi Daya. https://www.power-technology.com/data-insights/geothermal-power-in-indonesia/

8 Insinyur Konsultan Verkís. (2014). *Pembangkit listrik biner panas bumi: Studi pendahuluan pemanfaatan suhu rendah, perkiraan biaya, dan biaya energi*. https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/Iceida-geothermal-binary-overview_small.pdf



9 Klima. (n.d.). *Daya Panas Climeon*. https://climeon.com/heatpower-300-technology/
10 Laboratorium Energi Terbarukan Nasional (NREL). (2025, 27 Agustus). *Dasar-dasar produksi listrik panas bumi*. https://www.nrel.gov/research/re-geo-elec-production
11 Bhatia, SC (2014). *Sistem energi terbarukan yang canggih*. Penerbitan Woodhead India. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-269-3.50014-0
12 Badan Energi Internasional (IEA). (2024). *Masa depan energi panas bumi*. https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy/executive-summary
13 Badan Energi Internasional (IEA). (2023). *Energi terbarukan 2023: Panas*. https://www.iea.org/reports/renewables-2023/heat
14 Badan Energi Internasional. (2022). *Energi terbarukan 2022: Panas terbarukan*. https://www.iea.org/reports/renewables-2022/renewable-heat
15 Aliansi Global untuk Bangunan dan Konstruksi (GABC) & Badan Energi Denmark (DEA). (2022). *Peta jalan untuk sektor bangunan dan konstruksi rendah karbon yang hemat energi di Indonesia*. https://globalabc.org/sites/default/files/2022-08/Roadmap%20for%20an%20Energy%20Efficient%2C%20Low-Carbon%20Buildings%20and%20Construction%20Sector%20in%20Indonesia.pdf
16 Bellevrat, E., & Barat, K. (2018, 23 Januari). *Panas yang bersih dan efisien untuk industri*. Badan Energi Internasional. https://www.iea.org/commentaries/clean-and-efficient-heat-for-industry
17 Pengembalian Tenaga Surya. (2017, April). *Panas matahari untuk industri*. https://www.solar-payback.com/wp-content/uploads/2020/06/Solar-Heat-for-Industry-Solar-Payback-April-2017.pdf#page=2
18 IEA, 2024.
19 Taqwim, S., Saptadji, NM, Ashat, A., & Nugraha, T. (2013). Prospek penerapan pendinginan panas bumi skala besar di Indonesia. *Prosiding Lokakarya Panas Bumi Selandia Baru ke-35*. https://www.researchgate.net/publication/332035603_THE_PROSPECTS_FOR_LARGE_SCALE_APPLICATIONS_OF_GEOTHERMAL_COOLING_IN_INDONESIA
20 Webster, M., Fisher-Vanden, K., & Wing, I. S. (2024). Ekonomi transisi sistem kekuasaan. *Tinjauan Ekonomi dan Kebijakan Lingkungan, 18*(1). https://doi.org/10.1086/728101
21 Administrasi Informasi Energi AS. (n.d.). *Penjelasan listrik: Penyimpanan energi untuk pembangkit listrik*. https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/energy-storage-for-electricity-generation.php
22 Cariaga, C. (2025, 20 Juni). *Geo Dipa bermitra dengan konsultan Belanda untuk proyek percontohan lithium panas bumi di Indonesia*. PikirkanGeoEnergi. https://www.thinkgeoenergy.com/geo-dipa-partners-with-dutch-consultancy-for-geothermal-lithium-pilot-project-in-indonesia/
23 Negara Bagian New Mexico, Kantor Gubernur. (2025, 12 Juni). *Gubernur mengumumkan XGS Energy, kemitraan panas bumi Meta – proyek panas bumi 150 MW terkemuka di negara dalam perjalanan ke New Mexico* [Siaran pers]. https://www.governor.state.nm.us/2025/06/12/governor-announces-xgs-energy-meta-geothermal-partnership-nation-leading-150-mw-geothermal-project-on-its-way-to-new-mexico/
24 Kelkar, S., WoldeGabriel, G., & Rehfeldt, K. (2016). Pelajaran yang dipetik dari proyek batu kering panas perintis di Fenton Hill, AS. *Panas bumi, 63*, 5–14. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.08.008
25 Departemen Energi AS. (2024). *Jalur menuju lepas landas komersial: Tenaga panas bumi generasi berikutnya* [video YouTube]. https://www.youtube.com/watch?v=rZeObAoWAjg
26 Pambudi, N. A., & Ulfa, D. K. (2024). Lanskap energi panas bumi di Indonesia: Pembaruan komprehensif 2023 tentang pembangkit listrik, kebijakan, risiko, fase, dan peran pendidikan. *Tinjauan Energi Terbarukan dan Berkelanjutan, 189*, 114008. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114008
27 Satuan Tugas Udara Bersih. (n.d.). *Panas bumi batu superpanas*. https://www.catf.us/superhot-rock/

Bagian II

Lanskap Panas Bumi Indonesia dan Pilar Pertumbuhannya



Bab 2

Menggerakkan Transisi: Pasar dan Peluang Panas Bumi Indonesia

Raditya Wiranegara dan His Muhammad Bintang
Institute for Essential Services Reform

Pemerintah Indonesia memperkirakan potensi panas bumi hidrotermal konvensional mencapai 23,7 gigawatt. Namun, estimasi terbaru dari Project InnerSpace dan International Energy Agency menunjukkan bahwa Indonesia memiliki potensi teknis sebesar 2.160 gigawatt pada kedalaman hingga 5 kilometer di luar kawasan lindung, menjadikan Indonesia sebagai salah satu wilayah paling menjanjikan di dunia untuk pengembangan panas bumi generasi berikutnya.[1]

Selama bertahun-tahun, lembaga di Indonesia telah menetapkan target untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan dalam bauran energi primer. Namun pekerjaan tersebut kompleks sehingga kemajuannya berlangsung perlahan.

Secara historis, Indonesia yang dikenal sebagai Negeri Zamrud Khatulistiwa bergantung pada bahan bakar fosil. Pada tahun 2000, minyak, gas, dan batu bara memasok sedikit lebih dari 69% kebutuhan energi Indonesia. Pada 2013, angka tersebut meningkat menjadi sedikit di atas 91%.[2,3] Minyak pernah menjadi sumber energi utama Indonesia. Namun, ketika produksi minyak mentah terus menurun sementara konsumsi meningkat, Indonesia akhirnya harus beralih dari negara pengekspor menjadi pengimpor minyak. Pergeseran ini menimbulkan berbagai tantangan, termasuk ketidakseimbangan perdagangan dan penurunan penerimaan negara. Pada 2005, sektor minyak dan gas masih menyumbang 28% terhadap pendapatan nasional. Sepuluh tahun kemudian, kontribusinya merosot menjadi 8,5% berdasarkan analisis berbagai sumber data oleh Institute for Essential Services Reform (IESR).[4,5,6] Karena itu, pemerintah memutuskan untuk meningkatkan investasi pada batu bara dan gas alam serta menetapkan regulasi dalam Kebijakan Energi Nasional[7] yang mendorong "pemanfaatan minimal" produk minyak bumi.[8] Pada 2024, batu bara menyumbang 40% dari pasokan energi primer, minyak 28,6%, dan gas 16% (**Gambar 2.1**).[9] Meskipun pengembangan energi terbarukan terus meningkat terutama dari bioenergi, tenaga air, dan panas bumi, kontribusinya pada 2024 baru mencapai 15,4% dalam bauran energi. Angka ini baru



sekitar dua pertiga dari target dalam Rencana Umum Energi Nasional (**Gambar 2.2**).[10]

Dari seluruh bauran energi terbarukan tersebut, hanya 1,5% yang berasal dari panas bumi.

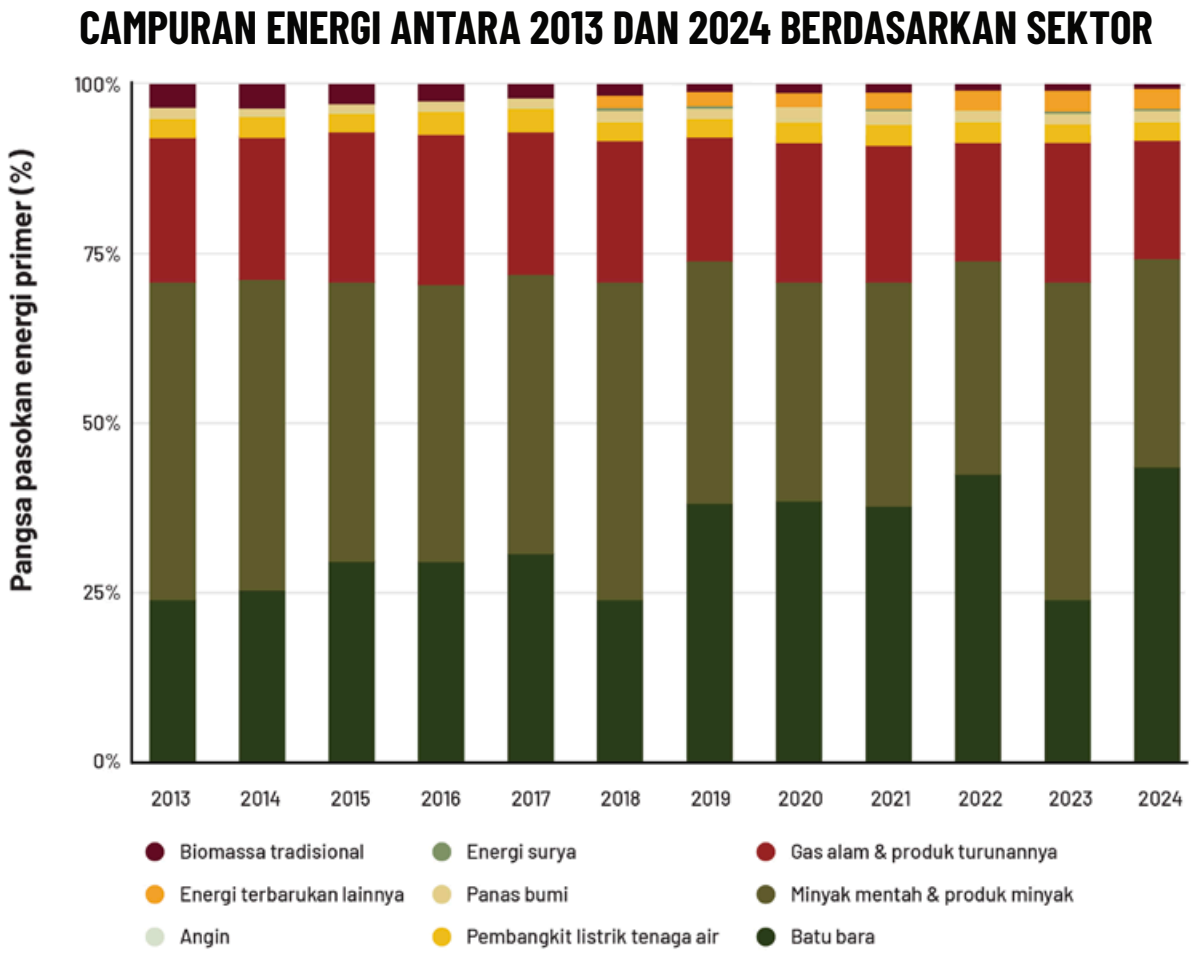
Angka ini menunjukkan peluang besar yang belum dimanfaatkan. Pemerintah memperkirakan pemanfaatan listrik panas bumi hidrotermal konvensional akan mencapai 23 gigawatt pada 2060.[11] Namun, estimasi terbaru dari Project InnerSpace dan International Energy Agency (IEA) menunjukkan bahwa Indonesia memiliki potensi teknis sebesar 2.160 gigawatt yaitu 94 kali lebih besar dari potensi 23 gigawatt yang telah diidentifikasi untuk panas bumi generasi berikutnya pada kedalaman hingga 5 kilometer di luar kawasan lindung. Potensi ini menjadikan Indonesia sebagai salah satu wilayah paling menjanjikan di dunia untuk pengembangan panas bumi.[12]

(Lihat Bab 1, "Panas bumi 101: Gambaran Umum tentang Teknologi dan Aplikasi Panas Bumi Terbaru" dan lampiran Bab 3, "Memperluas Cakupan: Peluang Pengembangan Geotermal Generasi Baru.")

Sayangnya, berbagai hambatan membuat pemanfaatan potensi tersebut semakin sulit untuk diwujudkan:

- Beragam kebijakan nasional menetapkan target energi terbarukan yang berbeda termasuk pengembangan panas bumi konvensional namun tidak ada peta jalan yang jelas untuk mencapainya.

- Indonesia memiliki sumber daya panas bumi untuk aplikasi direct use dan teknologi generasi berikutnya yang jumlahnya 100 kali lebih besar dibandingkan panas bumi konvensional. Sumber daya ini dapat secara signifikan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, meningkatkan kualitas udara dan



Gambar 2.1: Pangsa bauran energi primer berdasarkan jenis pembangkitan energi antara 2013 dan 2024. Sumber: Diadaptasi dari Ministry of Energy and Mineral Resources. (2025). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*. Government of Indonesia.

TARGET RENCANA UMUM ENERGI NASIONAL (RUEN) PER SEKTOR VS REALISASI CAMPURAN ENERGI

Sektor	Aspek	Target 2025	Realisasi 2024	Realisasi 2023
Listrik	% Bauran Energi Terbarukan	31.8%	17.7%	18.4%
Transportasi	% Energi Terbarukan Langsung	12.8%	13.8%	13.5%
	% Elektrifikasi	0.3%	0.1%	0.1%
Industry	% Energi Terbarukan Langsung	11.4%	9.9%	4.5%
	% Elektrifikasi	24.1%	12.4%	12.7%
Komersial & Rumah Tangga (Comm-HH)	% Energi Terbarukan Langsung	1.9%	1.7%	1.6%
	% Elektrifikasi	73.3%	61.0%	59.8%

Gambar 2.2: Perbandingan bauran energi terbarukan menurut sektor antara penggunaan pada 2023-2024 dan target Rencana Umum Energi Nasional 2025. Comm-HH = komersial dan rumah tangga. Energi Terbarukan Langsung = aktivitas atau proses yang menggunakan sumber daya energi terbarukan secara langsung. Elektifikasi = aktivitas atau proses yang menggunakan listrik. Sumber: Disusun oleh IESR menggunakan data dari Ministry of Energy and Mineral Resources. (2025). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*. Government of Indonesia.

ketahanan energi, serta memberikan manfaat ekonomi bagi negara. Namun belum ada struktur regulasi atau kebijakan untuk mengembangkan sumber daya ini dan tidak ada penyebutan tentangnya dalam target maupun perencanaan masa depan.

- Perencanaan terkait kebutuhan infrastruktur pendukung industri panas bumi di Indonesia masih sangat terbatas.

Bab ini membahas lanskap energi Indonesia yang kompleks serta berbagai peluang untuk memajukan pemanfaatan sumber daya panas bumi yang sangat besar di seluruh negeri.

PERATURAN PERUNDANG-UNDANGAN YANG MENGATUR TRANSISI ENERGI

Dua undang-undang membentuk kerangka hukum bagi kebijakan, pengembangan, dan tata kelola energi di Indonesia saat ini, yaitu: Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007[13] tentang Energi, dan Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009[14] tentang Ketenagalistrikan. (Rancangan Undang-Undang Energi Baru dan Terbarukan saat ini masih dalam proses penyusunan.[15])

Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi memberikan dasar hukum bagi pemanfaatan dan pengelolaan sumber daya energi. Undang-undang ini mewajibkan penyusunan Kebijakan Energi Nasional yang menetapkan tujuan jangka panjang untuk ketahanan dan keberlanjutan energi nasional. Untuk melaksanakan tujuan tersebut, pemerintah menetapkan Rencana Umum Energi Nasional yang berisi proyeksi, target, dan peta jalan untuk seluruh jenis energi, termasuk listrik, minyak, gas, batu bara, dan energi terbarukan[16]. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mengembangkan serta mengelola seluruh implementasinya. Undang-undang ini juga menetapkan bahwa energi terbarukan, termasuk proyek pengembangan panas bumi, berhak memperoleh insentif seperti kemudahan perizinan, insentif fiskal, pembebasan pajak, dan bantuan modal.

Melanjutkan turun ke tingkat peraturan di bawah undang-undang, Kebijakan Energi Nasional dan Rencana Umum Energi Nasional menjadi dasar penyusunan Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN). RUKN diperbarui setiap lima tahun agar dapat menyesuaikan perkembangan kondisi teknoekonomi, perubahan kebijakan, dan tren energi internasional. Versi 2025 menetapkan target panas bumi dalam bauran listrik

Indonesia pada 2060 sebesar 4,9% hingga 5,2% atau sekitar 21 gigawatt hingga 23 gigawatt.

Dalam Peraturan Pemerintah Nomor 40 Tahun 2025[17], yang menjadi kerangka kebijakan energi nasional berdasarkan Undang-Undang Energi panas bumi tercantum sebagai sumber pembangkitan listrik dan potensi untuk repowering pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara agar dapat menghasilkan hidrogen dan amonia. Namun, peraturan tersebut tidak memuat ketentuan khusus terkait pemanfaatan panas bumi untuk kebutuhan nonlistrik atau direct use. Untuk melihat detail potensi direct use nasional, lihat Bab 4 "Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung", dan untuk melihat kesenjangan kebijakan yang perlu ditangani guna membuka potensi tersebut, lihat Bab 7 "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia".

Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan[18], menyediakan kerangka regulasi bagi pasar ketenagalistrikan Indonesia yang mencakup pembangkitan, transmisi, distribusi, dan penjualan listrik. Undang-undang ini mendorong pemanfaatan sumber daya energi domestik dan memperluas peran pemerintah daerah serta badan usaha dalam penyediaan listrik di wilayahnya.

Peraturan Pemerintah Nomor 23 Tahun 2014 menegaskan bahwa Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral memiliki kewenangan untuk menyusun perencanaan ketenagalistrikan nasional melalui penyusunan RUKN dan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL). Kerangka ini memungkinkan badan usaha swasta berizin untuk mengoperasikan jaringan listrik mandiri yang melayani kawasan industri besar tertentu[19]. Untuk sektor panas bumi, ketentuan ini memungkinkan pengembang swasta memasok listrik langsung kepada pengguna captive di wilayah usahanya. Penjualan yang lebih luas ke jaringan publik tetap mengikuti perencanaan dan proses pengadaan PLN.

Sejumlah rekomendasi telah dikembangkan untuk mengklasifikasikan dan mengatur bentuk pemanfaatan panas bumi lainnya, termasuk pemanfaatan langsung (lihat Bab 7 "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia").

TARGET NET-ZERO INDONESIA

Versi terbaru Kebijakan Energi Nasional yang disusun pada September 2025, memiliki dampak berjenjang[20]. Dari kebijakan tersebut, ditetapkan beberapa sasaran berikut:

- **Kebijakan Energi Nasional (Dewan Energi Nasional):** Energi terbarukan ditargetkan mencapai 19% hingga 23% dalam bauran energi primer pada 2030 dan 70% hingga 72% pada 2060. Kebijakan ini juga memperkirakan emisi akan mencapai puncaknya pada 2035.[21]

- **Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (Kementerian ESDM):** RUKN 2024–2060 memproyeksikan porsi pembangkitan energi terbarukan mencapai 29,4% pada 2034 dan 50% pada 2060 baik pada jaringan utama di Jawa maupun jaringan mikro dan regional[22]. Rencana ini memperkirakan kapasitas PLTP akan mencapai 2 gigawatt pada 2035 dan 21 gigawatt pada 2060.

- **Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (PLN):** RUPTL 2025–2034 memproyeksikan pembangkitan energi terbarukan mencapai 34,3% pada jaringan on-grid wilayah Jawa pada 2034,[23] dengan kapasitas PLTP mencapai 5,2 gigawatt.

Untuk mencapai target 2060 dalam Kebijakan Energi Nasional, dua skenario disusun berdasarkan proyeksi pertumbuhan PDB yang sedikit berbeda.[24] Dalam kedua skenario tersebut, sektor energi tetap menggunakan sejumlah besar batu bara, minyak, dan gas pada 2060 (lihat **Gambar 2.3**). Saat ini, pemerintah berencana melakukan retrofit pada pembangkit berbahan bakar fosil terutama PLTU dan PLTG dengan teknologi carbon capture utilization and storage. Dalam kedua skenario, kontribusi panas bumi terhadap bauran energi primer yaitu seluruh sumber energi yang digunakan diproyeksikan mencapai 5% pada 2060 naik dari 2% hari ini. Kapasitas panas bumi diproyeksikan meningkat dari 2,68 gigawatt pada 2025 menjadi antara 18 gigawatt dan 22 gigawatt pada 2060.

Permintaan Listrik dan Bauran Energi Terbarukan

Terkait permintaan listrik, RUKN terbaru yang dirilis pada Maret 2025 memproyeksikan kebutuhan listrik



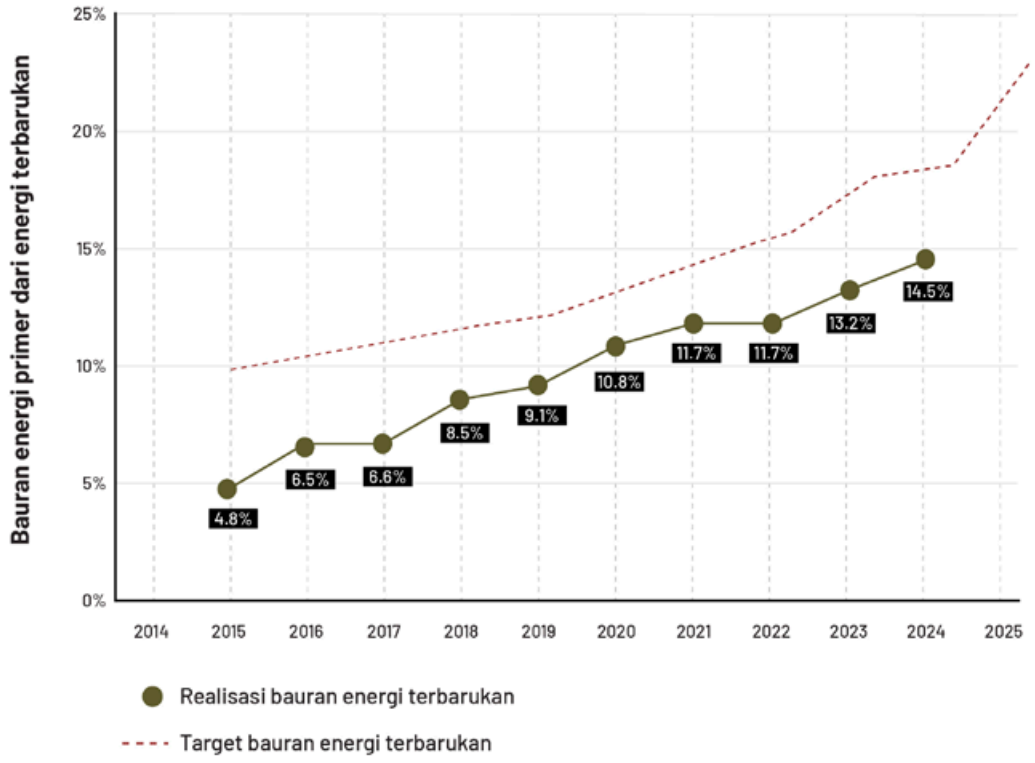
TARGET EMISI KEBIJAKAN ENERGI NASIONAL 2025

Hasil Utama	Skenario	2025	2030	2035*	2040	2050	2060
Emisi CO_2 ($MtCO_2e$)	S1	877	1,017	1,069	925	676	129
	S2	954	1,184	1,242	1.086	744	129
Pangsa energi primer dari energi terbarukan (%)	S1	17	19	25	36	53	70
	S2	19	23	27	40	55	72
Permintaan listrik per kapita (kWh/ kapita), termasuk captive	S1	1.896	2.346	2.920	3.328	4.444	5.038
	S2	2.231	3.075	3.957	4.809	5.994	6.526

***Emisi diperkirakan mencapai puncaknya pada tahun 2035.**

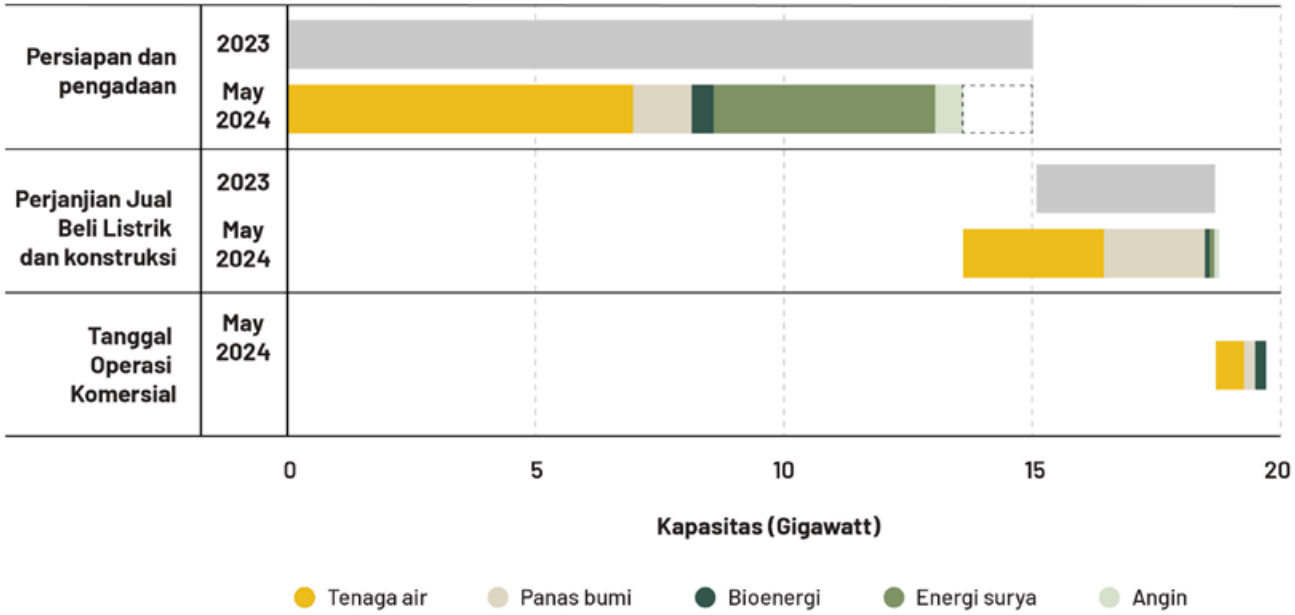
Gambar 2.3: Ringkasan target kebijakan energi nasional saat ini (emisi diperkirakan mencapai puncaknya pada 2035). CO_2 = karbon dioksida; kWh = kilowatt jam; $MtCO_2e$ = metrik ton setara karbon dioksida. Sumber: Diadaptasi dari International Energy Agency (IEA). (2022). *An energy sector roadmap to net zero emissions in Indonesia*.

TARGET VS REALISASI BAURAN ENERGI TERBARUKAN INDONESIA 2015–2025



Gambar 2.4: Perbandingan bauran energi terbarukan antara realisasi dan target pada 2015 hingga 2025. Sumber: Disusun oleh IESR menggunakan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*. Government of Indonesia.

PERKEMBANGAN PROYEK ENERGI TERBARUKAN PADA 2023 DAN 2024



Gambar 2.5: Perkembangan pembangunan proyek energi terbarukan antara 2023 dan Mei 2024 berdasarkan jenis energi dan tahapan siklus pembangunan proyek. COD = Commercial Operation Date GW = gigawatt PPA = Power Purchase Agreement. Sumber: Sisdwinugraha, A. P., et al. (2024). *Indonesia energy transition outlook 2025: Navigating Indonesia's energy transition at the crossroads: A pivotal moment for redefining the future*. IESR.

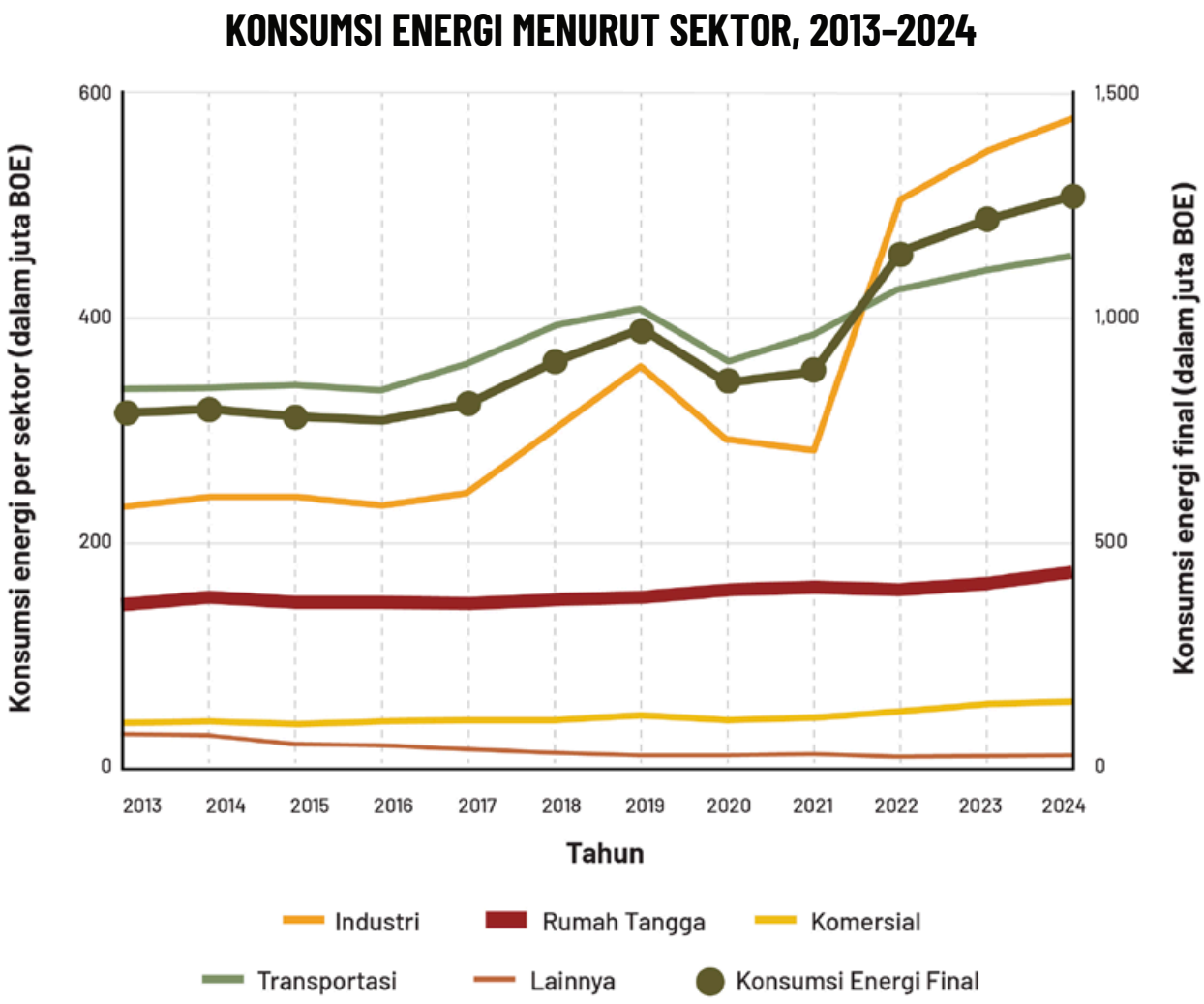
sebesar 5.038 kilowatt jam per kapita pada 2060. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, kapasitas pembangkitan perlu mencapai 443 gigawatt pada 2060 dengan 63,5% kapasitas listrik berasal dari energi terbarukan yaitu surya 24,6%, bayu 16,6%, hidro 15,9%, biomassa 1,3%, dan panas bumi 5,1%. Untuk menjaga stabilitas jaringan, proyeksi sekitar 443 gigawatt tersebut mencakup kapasitas penyimpanan energi sebesar 34 gigawatt.

Untuk kontribusi sekitar 5% dari panas bumi, kapasitas pembangkit yang diproyeksikan adalah sekitar 21 gigawatt. Pemerintah memperkirakan bahwa kapasitas tersebut akan memanfaatkan sekitar 89% dari potensi hidrotermal yang telah diidentifikasi Kementerian ESDM.[25] Namun, sebagaimana dijelaskan dalam lampiran Bab 3 "Memperluas Cakupan: Peluang Pengembangan Geotermal Generasi Baru", Indonesia memiliki potensi panas bumi yang jauh lebih besar. Dengan memasukkan potensi generasi berikutnya dari hot dry rock, potensi teknis panas bumi Indonesia meningkat menjadi 2.160 gigawatt. Membuka sebagian kecil dari potensi ini akan meningkatkan proyeksi energi secara signifikan pada setiap tahun proyeksi. Selain itu, investasi pada geothermal cooling dapat secara substansial menurunkan proyeksi permintaan energi.

Permintaan listrik telah tumbuh pada tingkat rata-rata 4,36% per tahun sejak 2013 menurut analisis.[26,27] Sebagian besar permintaan tersebut berasal dari sektor komersial sebesar 3,80%, rumah tangga 5,73%, dan transportasi 10,48%.[28]

Namun, hingga 2024 kapasitas terpasang on-grid untuk seluruh energi terbarukan di Indonesia baru mencapai 9,2 gigawatt.[29] Pada tahun yang sama, proyek dengan total kapasitas 5 gigawatt masih berada pada tahap Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik (Power Purchase Agreement/PPA) dan konstruksi (**Gambar 2.5**).[30] **Gambar 2.5** menunjukkan tenaga air dan panas bumi mendominasi proyek energi terbarukan on-grid.

Untuk kapasitas off-grid atau jaringan mikro dan regional kapasitas energi terbarukan diperkirakan mencapai 4,7 gigawatt pada 2024.[31] Bioenergi dan tenaga air



Gambar 2.6: Konsumsi energi sektoral dan energi final Indonesia pada 2013 hingga 2024 berdasarkan sektor. BOE = barrel of oil equivalent. Sumber: Disusun oleh IESR menggunakan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2023*. Government of Indonesia; Ministry of Energy and Mineral Resources. (2025). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*. Government of Indonesia.

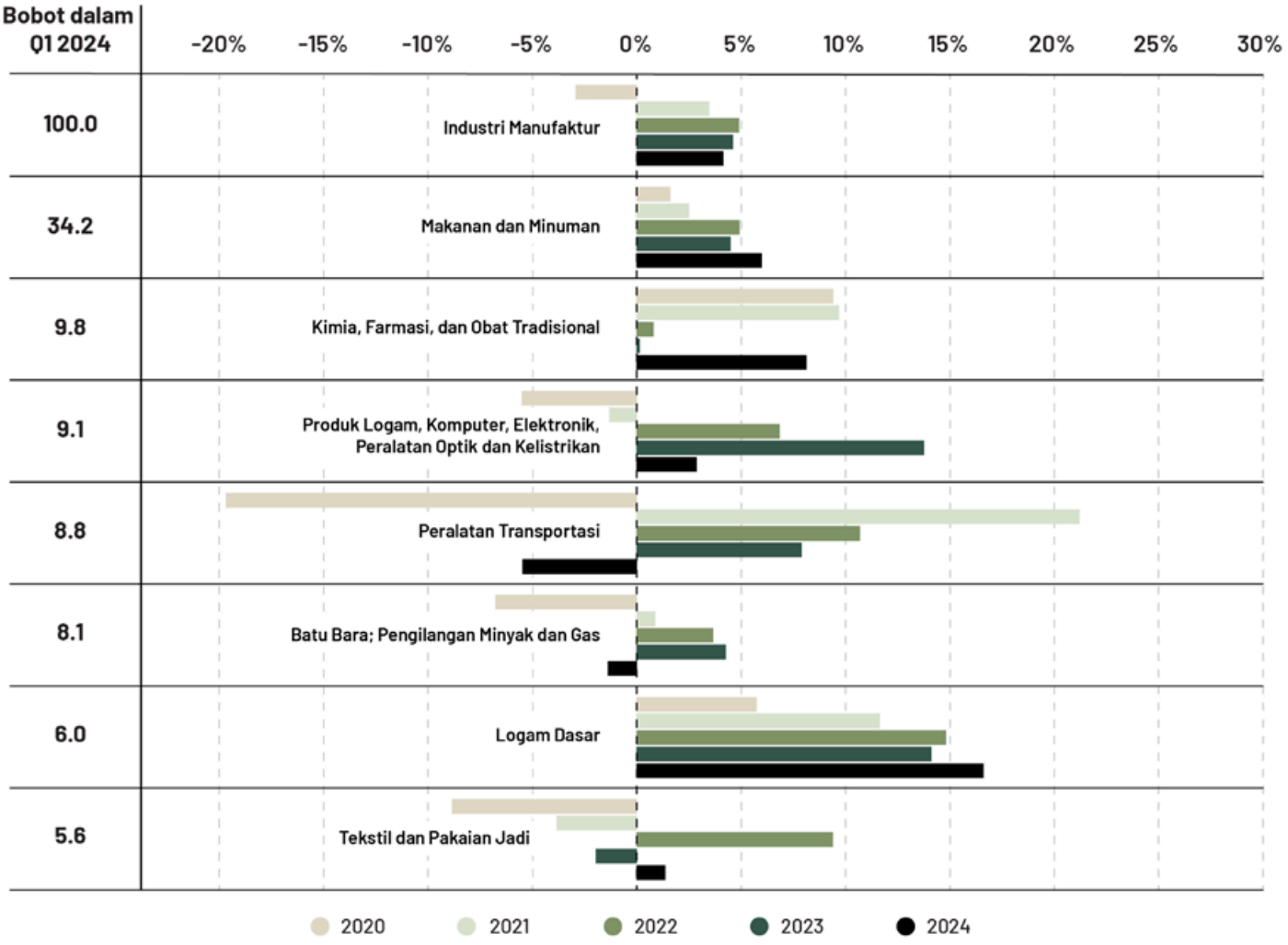
mendominasi pemanfaatan energi terbarukan pada pembangkit listrik off-grid.[32] Meskipun ini merupakan kemajuan yang baik, kesenjangan yang harus dipenuhi masih sangat besar untuk mencapai target perencanaan sektor ketenagalistrikan sebesar 37 gigawatt pada 2030.

PERTUMBUHAN KONSUMSI PADA SEKTOR PEMANAS PEMANFAATAN LANGSUNG: PELUANG BESAR

Sejak 2016, konsumsi energi di Indonesia tumbuh pada tingkat rata-rata 6,35% per tahun kecuali pada masa awal pandemi COVID-19 (**Gambar 2.6**). Setelah masa awal pandemi, Indonesia mengalami lonjakan tajam lebih dari 30% dalam konsumsi energi.

Di sektor industri, pertumbuhan konsumsi energi memiliki tingkat pertumbuhan tahunan sebesar 4,6%.[33] Pertumbuhan ini terutama didorong oleh industri logam dasar serta industri makanan dan minuman (**Gambar 2.7**). Industri kimia, farmasi, dan obat tradisional juga mengalami peningkatan. Subsektor-subsektor ini dikenal sebagai industri dengan intensitas energi tinggi yang membutuhkan uap dan panas bertekanan tinggi untuk mendukung proses inti mereka. Saat ini, sebagian besar kebutuhan tersebut dipenuhi oleh batu bara (lihat

PERTUMBUHAN KONSUMSI DI SEKTOR INDUSTRI, 2020–2024



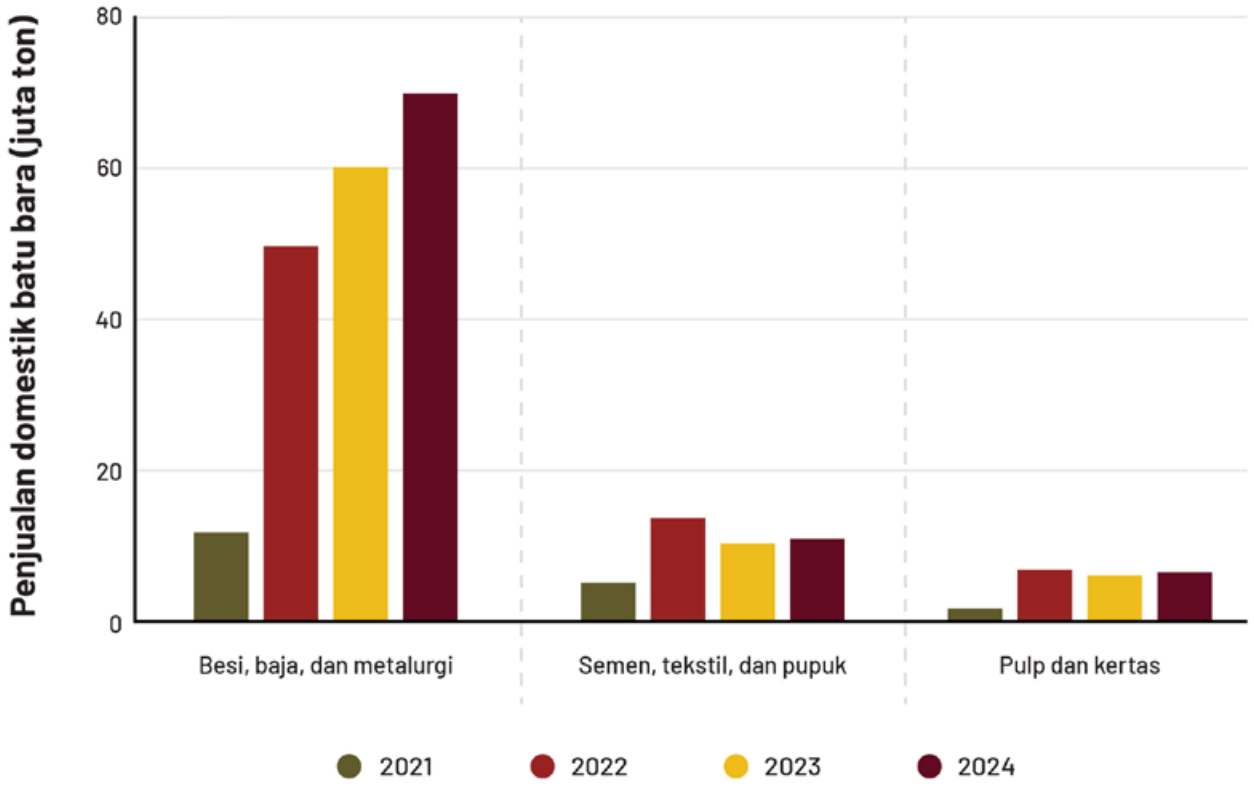
Gambar 2.7: Pertumbuhan sektor industri dan subsektornya antara 2020 dan kuartal pertama 2024. Bobot pada kuartal I 2024 menunjukkan ukuran subsektor di bawah industri manufaktur. Sumber: Ravindo, M. D. (2024). *Premature deindustrialization in Indonesia (?).* Institute for Economic and Social Research (LPEM), Faculty of Economics & Business (FEB), University of Indonesia; CEIC. (n.d.). *Indonesia*.

Gambar 2.8). Selain itu, sebagaimana dijelaskan dalam Bab 4 "Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung", sektor pertanian dan produk susu, pulp dan kertas, serta tekstil juga sangat bergantung pada kebutuhan uap dan panas.

Di sektor industri Indonesia saat ini, pemanfaatan energi terbarukan bergantung pada penggunaan biofuel dan biomassa industri yang secara keseluruhan mencakup 10% dari konsumsi energi final sektor industri pada 2024.[34] Di industri tekstil serta makanan dan minuman, energi surya dan biomassa banyak disebut sebagai solusi dalam upaya dekarbonisasi.

Namun, yang tidak tercakup dalam jalur dekarbonisasi kementerian adalah pemanfaatan langsung panas bumi, sebuah sumber energi yang sebenarnya telah digunakan di sektor ini selama beberapa tahun. Statistik terbaru dari Kementerian ESDM menunjukkan bahwa pemanfaatan langsung panas bumi baru tercatat sebesar 6 gigawatt jam sejak 2022, jumlah yang sangat kecil dalam konteks industri.[35] Meski demikian,

KONSUMSI BATU BARA PER INDUSTRI, 2021–2024



Gambar 2.8: Konsumsi batu bara menurut industri antara 2021 dan 2024. Sumber: Disusun oleh IESR menggunakan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*. Government of Indonesia.

beberapa peneliti memperkirakan bahwa angkanya mendekati 12 gigawatt jam. Jika menggunakan angka tersebut, Indonesia berada pada peringkat ke-74 dari 88 negara dalam pemanfaatan langsung panas bumi, peringkat yang tidak berubah sejak laporan pertama pada 1999.[36,37]

Melihat sumber daya dan potensi pemanfaatan langsung panas bumi di Indonesia (lihat Bab 4 "Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung"), peluangnya sangat besar, terutama bagi industri seperti pertanian dan produk susu, pulp dan kertas, serta tekstil. Sebagaimana diuraikan dalam Bab 4, sebanyak 89,8% permintaan panas untuk pemanasan proses di industri manufaktur, pendinginan dan penyimpanan dingin, serta HVAC di sektor permukiman dan komersial berpotensi dipenuhi oleh panas bumi pada 2050. Penting dicatat, pada 2050 seluruh kebutuhan panas proses sektor pulp dan kertas diproyeksikan dapat dijangkau oleh panas bumi, dan bahkan saat ini seluruh kebutuhan panas industri tekstil berada di bawah 100°C sehingga dapat sepenuhnya beralih ke panas bumi sekaligus menurunkan biaya bahan bakar dan meningkatkan produktivitas industri. Pemanfaatan potensi ini dapat memberikan penghematan biaya yang signifikan bagi pelaku usaha dengan menggantikan bahan bakar impor yang mahal menggunakan energi panas bumi yang stabil dan tersedia di dalam negeri, sehingga meningkatkan daya saing dan produktivitas industri.

Dengan tambahan kapasitas 25 gigawatt listrik dari panas bumi pada 2045, porsi energi terbarukan dalam sektor ketenagalistrikan dapat mencapai 67% atau hampir 19% lebih tinggi daripada jalur Kementerian ESDM saat ini.[38,39]

PEMBANGKIT LISTRIK DAN POTENSI PANAS BUMI GENERASI BERIKUTNYA

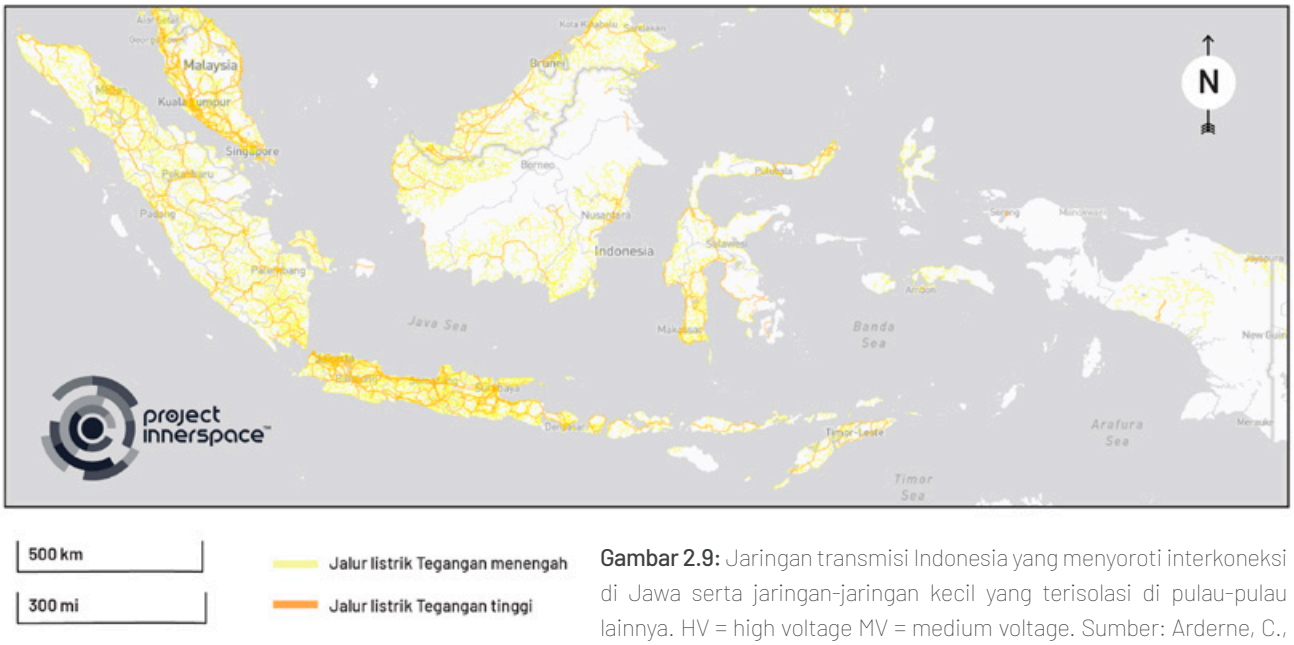
Selain pemanfaatan langsung, Indonesia memiliki sejumlah sektor lain terutama yang membutuhkan energi panas dan listrik yang dapat memanfaatkan sumber daya panas bumi Indonesia dan kemajuan teknologi panas bumi generasi berikutnya.[40] Teknologi ini termasuk engineered geothermal systems (EGS) dan advanced geothermal systems (AGS) yang memungkinkan industri panas bumi memperluas pemanfaatannya melampaui sumber daya hidrotermal konvensional dan memanfaatkan panas dari *hot dry rock*. (Lihat Bab 1 "Panas Bumi 101 Gambaran Umum tentang Teknologi dan Aplikasi Panas Bumi Terbaru" dan Bab 3 "Di Dasar Kepulauan Sistem Geotermal Konvensional Indonesia.")

Seperti disebutkan sebelumnya, Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional memproyeksikan porsi pembangkitan energi terbarukan sebesar 29,4% untuk on-grid dan off-grid pada 2034 dengan kapasitas pembangkit panas bumi sebesar 6,7 gigawatt.[41] Rencana tersebut juga menyatakan bahwa pada 2060 pemerintah berencana memanfaatkan 96% potensi panas bumi konvensional yaitu 23,7 gigawatt. Pulau Jawa tetap menjadi pusat proyek ini diikuti oleh Sumatra, Kepulauan Nusa Tenggara, Sulawesi, Kepulauan Maluku, dan Bali yang semuanya berada di atas formasi *Ring of Fire*.

Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik memproyeksikan bauran energi terbarukan nasional mencapai 34,3% on-grid pada 2034 dengan kapasitas pembangkit panas bumi sebesar 5,2 gigawatt.[42] Dokumen ini juga membatasi perusahaan penyedia tenaga listrik untuk membangkitkan, menyalurkan, dan mendistribusikan listrik hanya dalam wilayah usaha yang telah ditetapkan. Namun, rencana tersebut belum menyediakan peta jalan pengembangan dan tidak mempertimbangkan potensi panas bumi generasi berikutnya yang sangat besar.

Sebaliknya, jika potensi teknis panas bumi Indonesia yang sangat melimpah dikembangkan dan kebijakan pendukung diterapkan, dalam 10 tahun Indonesia dapat membangun 15 gigawatt listrik panas bumi baseload dan 15 gigawatt panas bumi termal jauh lebih cepat daripada rencana saat ini. Pada 2045, kapasitas tersebut dapat

JARINGAN KELISTRIKAN INDONESIA



Gambar 2.9: Jaringan transmisi Indonesia yang menyoroti interkoneksi di Jawa serta jaringan-jaringan kecil yang terisolasi di pulau-pulau lainnya. HV = high voltage MV = medium voltage. Sumber: Arderne, C., Zorn, C., Nicolas, C. & Koks, E. E. (2020). *Predictive mapping of the global power system using open data*. *Scientific Data*, 7, 19; OpenStreetMap contributors. (2023). *Planet OSM*; OpenStreetMap. (n.d.). *OpenStreetMap*.

meningkat menjadi 25 gigawatt listrik dan 35 gigawatt panas. (Lihat Bab 7, "Bab 7, Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia") Dengan tambahan kapasitas 25 gigawatt listrik dari panas bumi pada 2045, porsi energi terbarukan dalam sektor ketenagalistrikan dapat mencapai 67% atau hampir 19% lebih tinggi daripada jalur Kementerian ESDM saat ini.[43]

HAMBATAN DALAM PENGEMBANGAN PEMBANGKIT DAN PEMANFAATAN LANGSUNG

Indonesia menghadapi sejumlah hambatan untuk mencapai target tersebut. Seperti disebutkan sebelumnya, saat ini tidak ada struktur kebijakan atau regulasi yang memuat jalur pemanfaatan langsung panas bumi. Indonesia juga menghadapi ketidakpastian regulasi, perizinan, dan harga kompleksitas birokrasi serta kebijakan tata guna lahan yang saling tumpang tindih.[44] Pengembangan panas bumi dapat sangat mahal tanpa dukungan dan pembiayaan yang tepat dan perhitungan levelized cost of energy juga menjadi tantangan dalam beberapa tahun terakhir. Negara ini juga memiliki sedikit rencana untuk mengatasi kebutuhan infrastruktur guna mendukung perluasan pemanfaatan panas bumi.

Keandalan Jaringan Listrik

Karena karakter geografisnya sebagai negara kepulauan, jaringan listrik Indonesia terfragmentasi. Saat ini jaringan interkoneksi hanya ada antara Pulau Jawa, Madura, dan Bali. Jaringan Jawa merupakan yang paling maju dan paling terhubung di Indonesia; jaringan ini memiliki dua saluran transmisi listrik bertegangan tinggi yang membentang dari bagian timur hingga barat pulau dengan kapasitas masing-masing 500 kilovolt. Sistem berikutnya yang paling maju berada di Sumatra dengan saluran transmisi berkapasitas 275 kilovolt yang menghubungkan wilayah utara dan selatan pulau tersebut. Sementara itu, jaringan listrik di pulau lain seperti Kalimantan, Sulawesi, dan Papua masih terisolasi dan beroperasi secara mandiri (lihat **Gambar 2.9**).

Gagasan "tidak ada transisi tanpa transmisi" menggambarkan kondisi Indonesia saat ini. Terdapat ketidaksesuaian antara wilayah dengan potensi energi terbarukan yang sangat besar dan wilayah dengan permintaan energi tertinggi. Menurut estimasi Kementerian ESDM tahun 2021, hampir 98% pasokan energi terbarukan berada di luar Jawa[45], tetapi pada 2024 sekitar 68% konsumsi listrik nasional berada di Jawa.[46] Temuan ini tidak mengejutkan mengingat pulau tersebut merupakan wilayah terpadat di Indonesia dan menjadi pusat industri yang sangat intensif energi.[47]

Tanpa pembangunan infrastruktur, Indonesia tidak akan mencapai target transisi energinya. Menurut rencana terbaru, PLN berencana membangun hampir 48.000 kilometer jaringan transmisi baru serta 108.000 gardu listrik di seluruh Indonesia.[48] Infrastruktur ini juga akan mendukung interkoneksi antarpulau dan koneksi internal di dalam pulau.

PLN memperkirakan bahwa US$35 miliar diperlukan untuk membangun seluruh infrastruktur tersebut dalam 10 tahun ke depan. Dengan tingkat pengembalian hanya sekitar 2% hingga 4%, pembangunan jaringan transmisi dan distribusi secara finansial tidak menarik sehingga diperlukan sumber pembiayaan alternatif. Jumlah investasi sebesar itu tidak mungkin ditanggung PLN hanya dari anggarannya sendiri.[49]

Tingginya Biaya Pembangunan

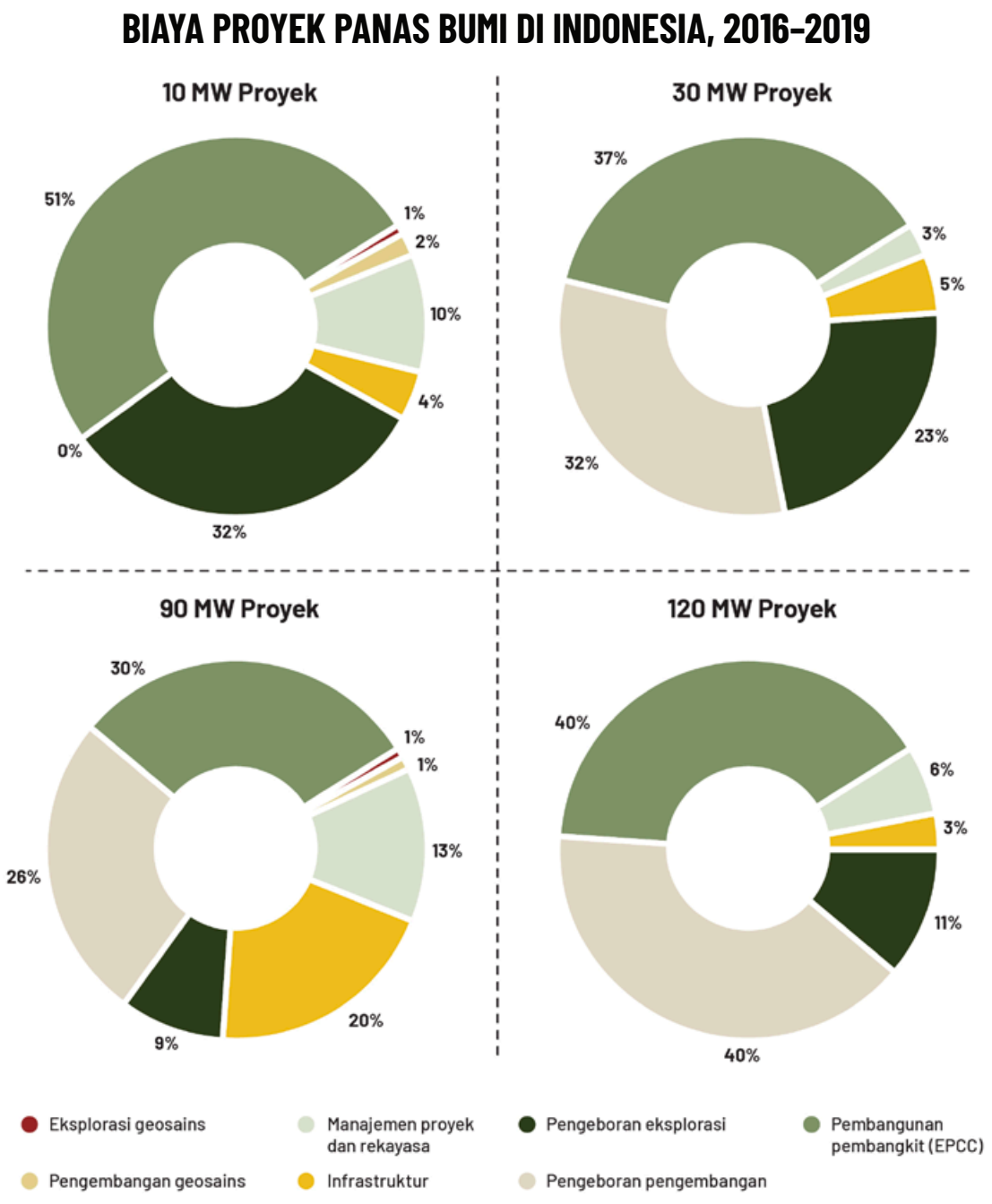
Pembangunan pembangkit listrik panas bumi membutuhkan modal yang besar karena prosesnya panjang dan kompleks, mulai dari eksplorasi hingga operasi. Di Indonesia, kondisi geografis dan ketidakseimbangan kekuatan jaringan listrik semakin meningkatkan biaya eksplorasi panas bumi. Keterbatasan data juga menambah ketidakpastian dan risiko.[50]

Membangun pembangkit listrik panas bumi berkapasitas antara 50 megawatt dan 100 megawatt dapat memakan waktu 5 hingga 10 tahun, dengan tingkat kompleksitas yang tinggi pada setiap tahap.[51,52,53] (Lihat Bab 6, "Mencari Titik Temu: Membangun Kepercayaan dan Transparansi dalam Transisi Energi Indonesia," dan Bab 8, "Harmoni dalam Panas: Melindungi Alam dan Komunitas dalam Generasi Berikutnya dari Pengembangan Panas Bumi" untuk penjelasan lebih lanjut). Pengeboran sumur eksplorasi, produksi, dan reinjeksi mencakup antara 35% hingga 46% dari total biaya investasi pengembangan panas bumi.[54] Proses termahal berikutnya adalah pembangunan fasilitas permukaan, termasuk desain



dan ukuran atau optimasi turbin uap yang spesifik pada lokasi.[55,56] Untuk pengembangan panas bumi konvensional, komposisi kimia fluida panas bumi yang bersifat korosif seperti hidrogen sulfida dan karbon dioksida turut mempersulit desain turbin uap.[57,58]

Empat proyek panas bumi dengan kapasitas pembangkitan berbeda dibangun antara 2016 dan 2019. Biaya pengeboran untuk proyek-proyek ini bervariasi antara 32% hingga 55% dari total biaya (lihat **Gambar 2.10**).[59] Berdasarkan tinjauan terhadap 203 sumur yang



Gambar 2.10: Struktur biaya pembangunan pembangkit listrik panas bumi di Indonesia antara 2016 dan 2019 yang menunjukkan bahwa biaya pengeboran mencakup antara 32% hingga 55% dari total biaya proyek. Sumber: Purwanto, E. H., Suwarno, E., Hakama, C., Pratama, A. R., & Herdiyanto, B. (2021). *An updated statistic evaluation of drilling performance, drilling cost and well capacity of geothermal fields in Indonesia*. In *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland.

diselesaikan antara 2011 dan 2019, biaya pengeboran berkisar antara US$1,3 juta hingga US$18 juta.[60]

Selain itu, memperkirakan biaya pembangunan pembangkit listrik panas bumi di Indonesia dengan menggunakan *levelized cost of energy* (LCOE) dapat menjadi rumit akibat asumsi keuangan yang terlalu rendah. Dengan menggunakan metode perhitungan LCOE sederhana,[61] Institute for Essential Services Reform (IESR) menelaah data keuangan dari dokumen Kementerian ESDM yang diterbitkan pada 2017,[62] 2021,[63] dan 2024[64] (**Gambar 2.11**). Semua nilai rekomendasi tampak lebih rendah ketika menggunakan data dari versi dokumen yang lebih lama.[65] Namun, data terbaru dari laporan Technology Data for the Indonesian Power Sector milik Kementerian ESDM menunjukkan nilai LCOE yang tampak lebih selaras dengan proyek-proyek baru yang mulai beroperasi. Laporan Kementerian ESDM tersebut juga memuat koreksi signifikan terhadap perkiraan belanja modal dan biaya operasional.[66] Perkiraan biaya operasional dalam dokumen 2024 meningkat hingga enam kali lipat, dan belanja modal meningkat 25% dibandingkan perkiraan tahun 2017. Perubahan ini wajar mengingat inflasi serta meningkatnya biaya tenaga kerja terampil dan komponen teknologi.

Karena adanya ketidakpastian pada angka-angka tersebut yang dapat berujung pada ketidakpastian biaya proyek panas bumi di Indonesia para pengembang perlu melakukan analisis biaya dan risiko secara menyeluruh. Pembuat kebijakan juga perlu memperkuat mekanisme dukungan mitigasi risiko. Laporan Technology Data for the Indonesian Power Sector dari Kementerian ESDM merupakan rujukan utama bagi banyak kajian sektor ketenagalistrikan di Indonesia dan sering digunakan untuk mendukung penyusunan peta jalan serta regulasi nasional. Oleh karena itu data tersebut seharusnya menjadi acuan penting bagi calon investor ketika menilai peluang khususnya untuk proyek panas bumi. Menariknya nilai LCOE rekomendasi yang dihitung sebagai estimasi rata rata atau estimasi sentral secara konsisten terlihat lebih rendah jika menggunakan data finansial dari versi laporan yang lebih lama.

Dalam laporan terbaru IEA berjudul *The Future of Geothermal Energy* ditemukan bahwa LCOE panas bumi generasi berikutnya dalam skenario biaya rendah dapat turun hingga sekitar US$50 per megawatt jam pada 2035 dan sekitar US$30 per megawatt jam pada 2050."[67] Laporan tersebut juga menyatakan bahwa LCOE tidak mempertimbangkan dampak dan interaksi dalam sistem tenaga listrik sehingga bukan indikator yang andal untuk menilai daya saing ketika membandingkan teknologi dengan karakteristik operasional yang sangat berbeda terutama antara pembangkit firm dan pembangkit terbarukan variabel. Dengan kata lain LCOE cenderung meremehkan nilai tambah panas bumi seperti bersih dapat diandalkan tidak memiliki biaya bahan bakar dan menyediakan layanan pendukung jaringan.[68] Analisis IEA menemukan bahwa setelah mempertimbangkan manfaat tersebut panas bumi menjadi lebih kompetitif dibandingkan pembangkit surya PV dan angin pada 2035."[69]

MENGATASI HAMBATAN PELUANG PANAS BUMI

Untuk memperlancar pengembangan panas bumi pada awal 2025 pemerintah mulai merevisi regulasi pemanfaatan tidak langsung panas bumi yaitu Peraturan Pemerintah Nomor 7 Tahun 2017. Revisi ini mencakup tujuh belas isu untuk dipertimbangkan termasuk perubahan skema lelang mineral ikutan dari kegiatan panas bumi serta jaminan pemulihan lingkungan.[70] Revisi tersebut diperkirakan terbit pada Desember 2025.[71]

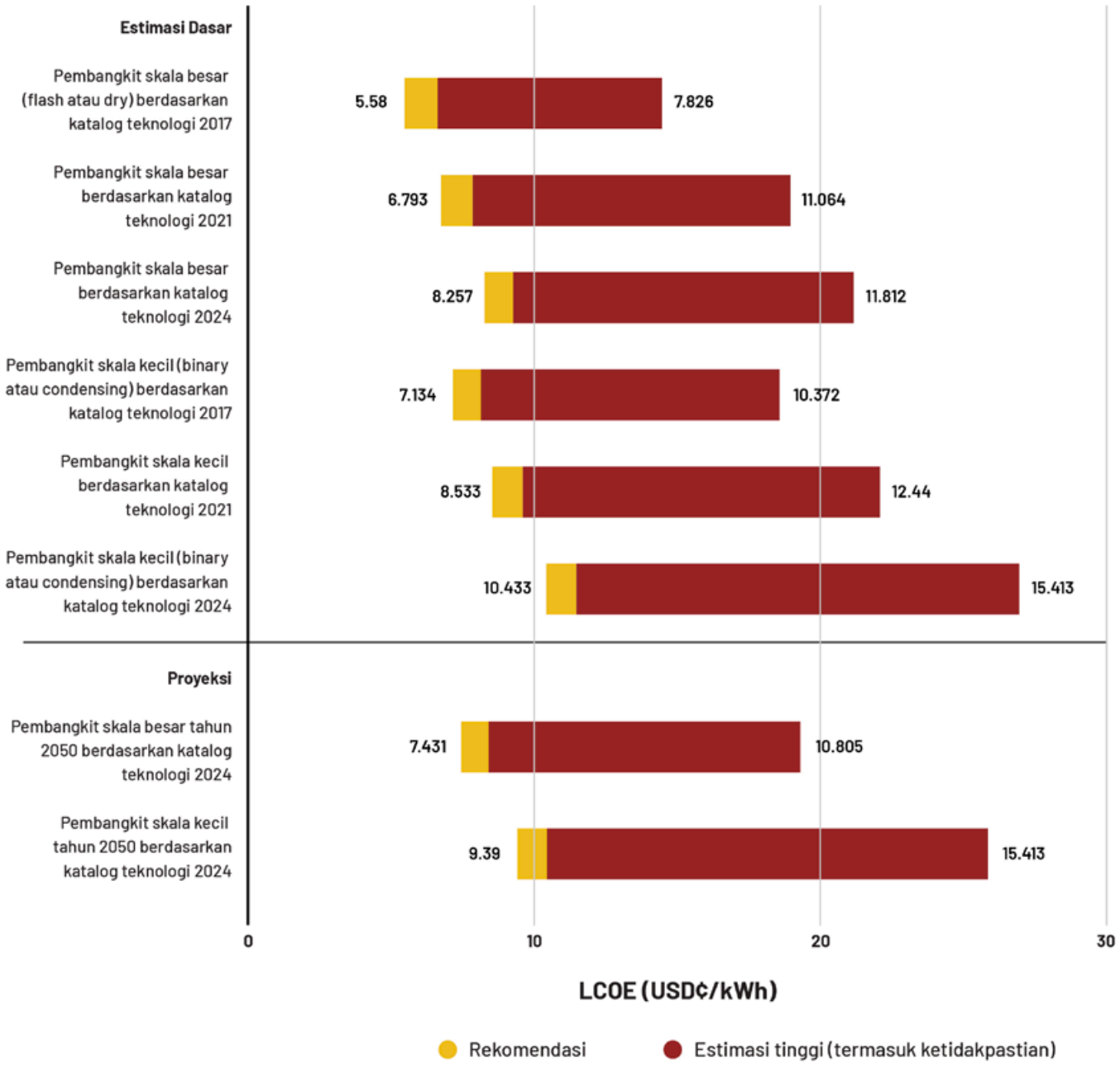
Alih Fungsi Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pada 2022 pemerintah menerbitkan regulasi yang memberikan dasar hukum bagi transisi dari bahan bakar fosil khususnya batu bara. Regulasi ini mewajibkan Kementerian ESDM untuk menyusun peta jalan pengakhiran operasi PLTU,[72] dan mengatur bahwa PLTU dapat digantikan oleh pembangkit berbasis energi terbarukan untuk menjaga keandalan pasokan listrik.[73] (Regulasi tersebut juga memperkenalkan tarif batas atas baru sesuai lokasi dan jenis energi terbarukan.) Regulasi tersebut juga memuat ketentuan dukungan dan insentif pemerintah untuk pengembangan panas bumi antara lain pada tahap eksplorasi sebagai berikut:[74]

- Penunjukan badan layanan umum atau BUMN untuk mengumpulkan data panas bumi tambahan
- Penunjukan pengembang untuk melakukan survei pendahuluan dan eksplorasi dengan imbalan hak memadankan dalam lelang Wilayah Kerja Panas Bumi



ESTIMASI LCOE PEMBANGKIT LISTRIK PANAS BUMI, 2017–2024



Gambar 2.11: Perkiraan levelized cost of electricity (LCOE) untuk pembangkit listrik panas bumi skala kecil dan skala besar. kWh = kilowatt jam. Sumber: Institute for Essential Services Reform (IESR), menggunakan metodologi dari Bintang, H. M. (2023). *Making energy transition succeed: A 2023's update on the levelized cost of electricity (LCOE) and levelized cost of storage (LCOS)*. IESR. Additional data from Ea Energy Analyses. (2017). *Technology data for the Indonesian power sector: Catalogues for generation and storage of electricity*; Ea Energy Analyses. (2021). *Technology data for the Indonesian power sector: Catalogue for generation and storage of electricity*; Ea Energy Analyses. (2024). *Technology data for the Indonesian power sector: Catalogue for generation and storage of electricity*.

- Langkah langkah untuk mengurangi risiko proyek bagi pelaku usaha dan kontraktor panas bumi
- Fasilitas pembiayaan

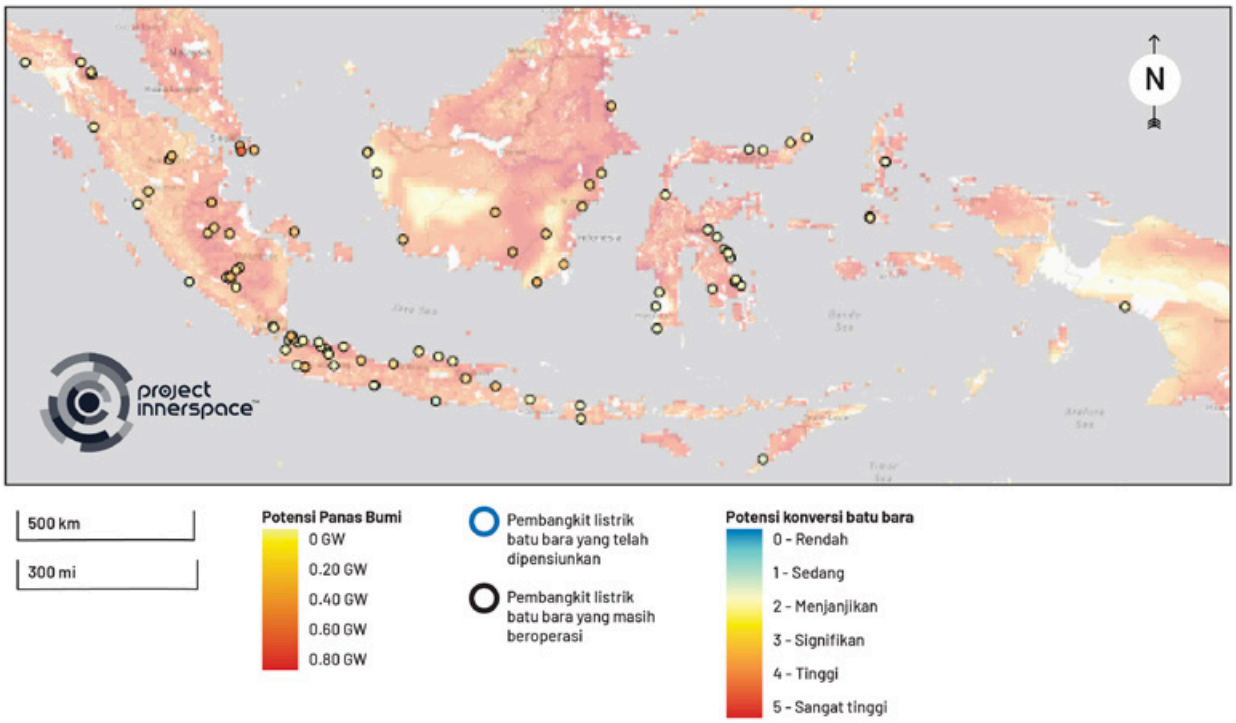
Regulasi tersebut juga mensyaratkan penggunaan proses lelang dengan batas waktu. PLN juga secara tidak langsung ditugaskan untuk membeli listrik dari pembangkit panas bumi guna memastikan adanya offtaker dan mengurangi ketidakpastian tarif.[75]

Regulasi lainnya yaitu Peraturan Menteri ESDM Nomor 10 Tahun 2025 tentang Peta Jalan (Road Map) Transisi Energi Sektor Ketenagalistrikan memberikan dasar hukum bagi sektor ketenagalistrikan untuk bertransisi dari ketergantungannya pada batu bara dan emisi gas rumah kaca. Strategi untuk mencapai target tersebut meliputi retrofit pembangkit fosil percepatan pengembangan energi terbarukan variabel penambahan kapasitas pembangkitan berbasis energi baru dan terbarukan produksi hidrogen hijau atau amonia hijau peningkatan infrastruktur jaringan melalui kapasitas yang lebih besar dan teknologi smart grid serta percepatan pengakhiran operasi PLTU.[76] (Lihat Rekomendasi Nomor 2 dalam Bab 7, "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia," untuk penjelasan lebih lanjut.)

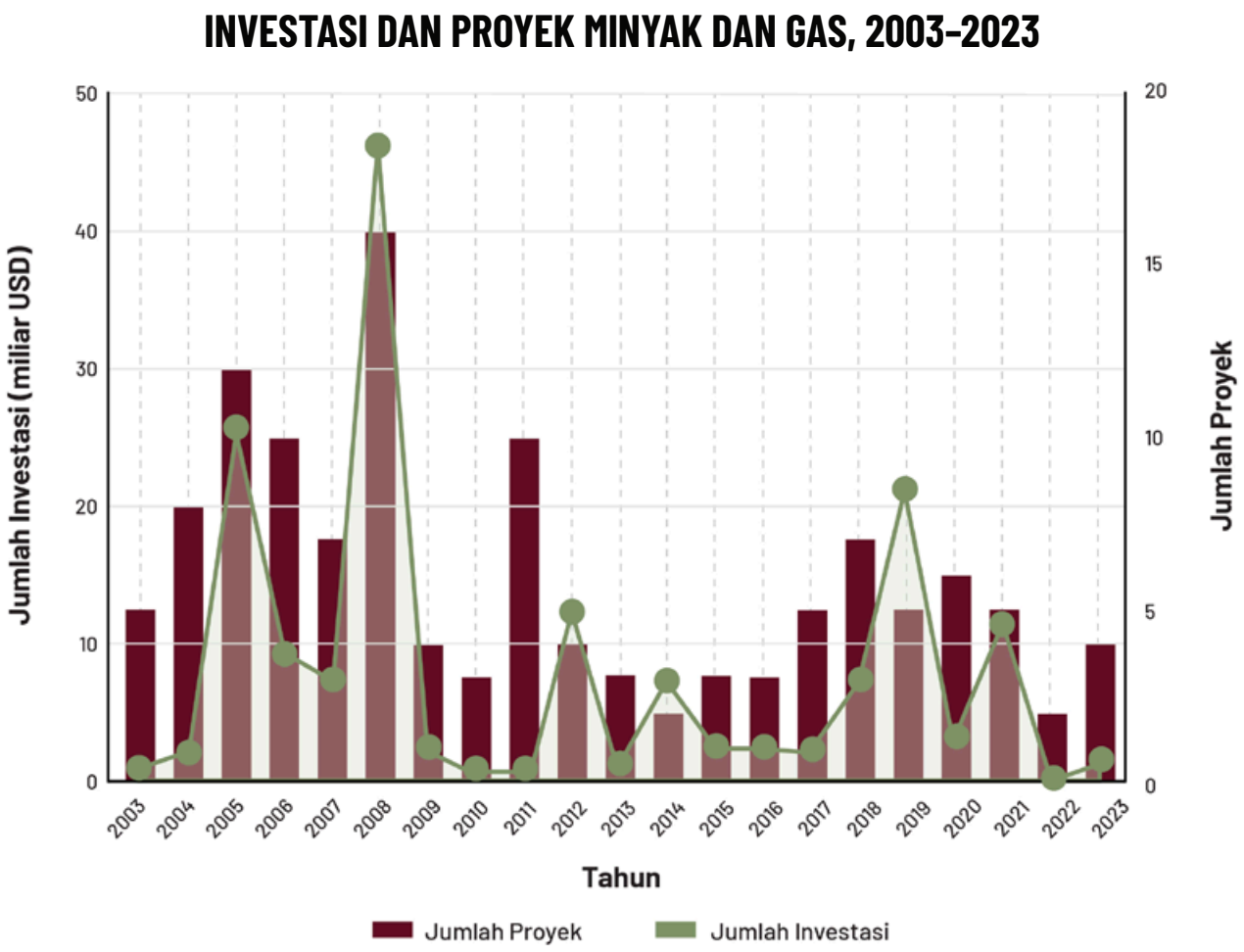
Semua strategi tersebut relevan bagi panas bumi. Teknologi panas bumi generasi berikutnya memungkinkan PLTU tidak hanya diretrofit tetapi juga dialihfungsikan menjadi pembangkit listrik panas bumi dengan mengganti komponen boiler batu bara dengan siklus uap air panas bumi.

Sebagai langkah awal pengembang dapat membangun fasilitas panas bumi di dekat PLTU. Ada potensi untuk memanfaatkan air limbah PLTU guna menciptakan mengisi dan mengoperasikan reservoir EGS.[77] Pendekatan serupa juga dapat diterapkan pada percepatan pengakhiran operasi PLTU khususnya di Jawa dan Sumatra dua wilayah dengan potensi panas

FASILITAS BATU BARA YANG BERADA DI ATAS SUMBER DAYA PANAS BUMI



Gambar 2.12: Peta yang menunjukkan potensi panas bumi kumulatif antara kedalaman 0 meter hingga 5.000 meter dengan batas suhu 150 derajat Celsius sebagai ambang minimum untuk pembangkitan listrik yang ditampilkan bersama lokasi pembangkit listrik tenaga uap batu bara serta tingkat kesesuaiannya untuk dikonversi menjadi pembangkit panas bumi. Sumber: Project InnerSpace. (n.d.). *Today's Power Potential GW 5000m* [Power Generation Module]. GeoMap; Project InnerSpace. (n.d.). *Coal Plant WOA* [Indonesia



Gambar 2.13: Total nilai investasi dan jumlah proyek di sektor minyak dan gas Indonesia dari 2003 hingga 2023. Sumber: Baker Hughes. (n.d.). *Rig count overview and summary count*.

bumi yang sangat besar (lihat **Gambar 2.12**).[78] Data bahkan menunjukkan bahwa dua PLTU tertua di Indonesia yaitu Suralaya dan Bukit Asam memiliki potensi besar untuk dikonversi menjadi pembangkit listrik panas bumi.

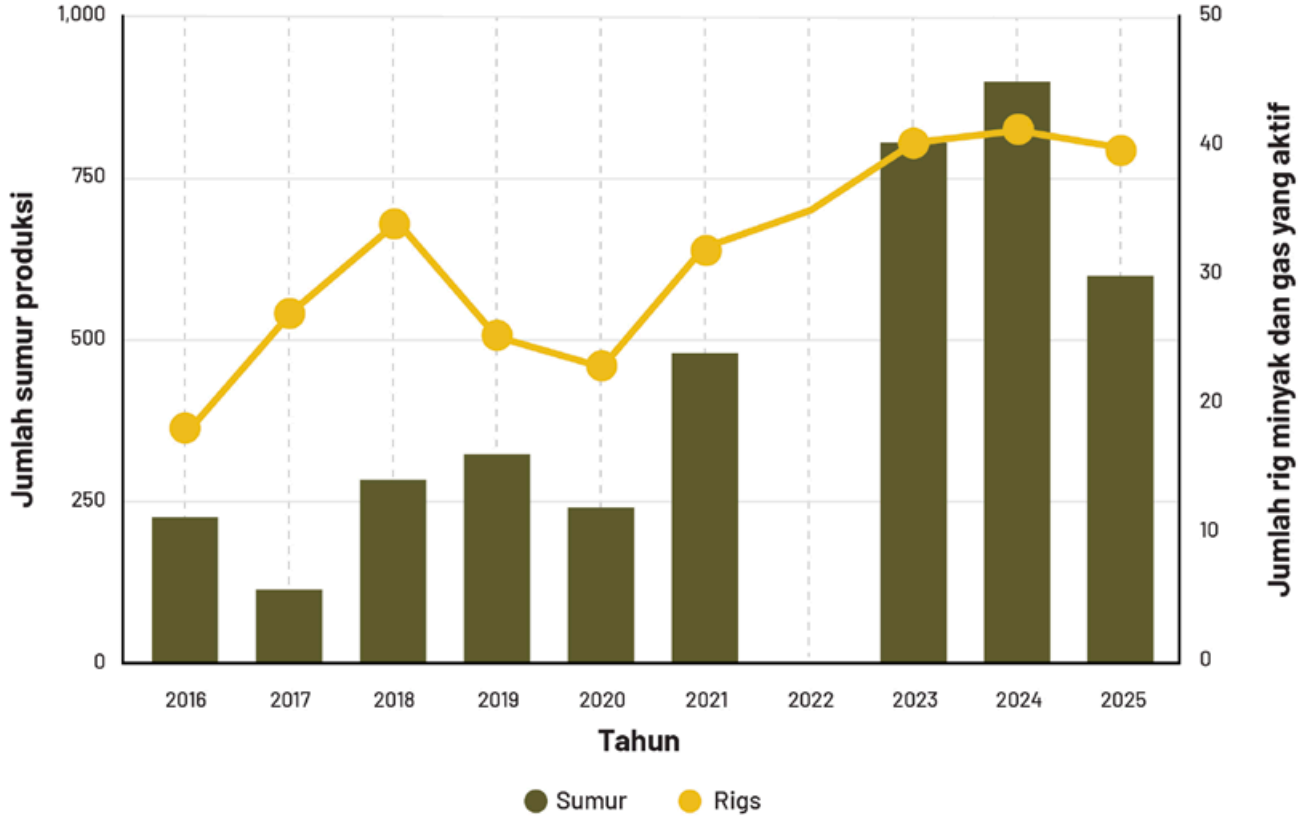
Panas Bumi untuk Produksi Hidrogen Hijau

Sumber daya panas bumi juga dapat dimanfaatkan untuk memproduksi hidrogen hijau. Peta jalan Kementerian ESDM memperkirakan bahwa panas bumi saat ini hanya dapat menghasilkan sekitar 4,6 ton hidrogen per tahun karena asumsi bahwa sebagian besar potensi panas bumi saat ini akan habis digunakan untuk pembangkitan listrik.[79] Estimasi baru untuk potensi panas bumi generasi berikutnya yaitu 2.160 gigawatt mengubah asumsi tersebut. Penelitian juga menunjukkan bahwa panas bumi dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen hijau melalui proses termolisis dan pemanfaatan langsung uap.[80] Sejak awal 2024, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Kamojang telah mengoperasikan fasilitas percontohan hidrogen hijau yang menghasilkan sekitar 4,3 ton hidrogen per tahun dengan tingkat kemurnian dilaporkan mencapai 99,9%.[81]

Panas Bumi untuk Pusat Data

Menggabungkan pusat data dengan sumber daya panas bumi dapat menyediakan listrik rendah karbon yang stabil dan langsung dari sumbernya. Analisis terbaru di Amerika Serikat menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat menurunkan biaya listrik rata rata antara sekitar 31% dan 45% dibandingkan model pusat data yang bergantung pada jaringan.[82] Indonesia berada pada posisi yang baik untuk memimpin perubahan ini. Hingga Mei 2023, PLN melayani 128 pelanggan pusat data dengan beban hampir 1 gigawatt, dan permintaan diproyeksikan mencapai 4

SUMUR PRODUKSI DAN RIG AKTIF, 2016–2025



Gambar 2.14: Jumlah sumur eksploitasi dan rig minyak dan gas aktif di Indonesia antara 2016 dan 2025 data hingga Agustus 2025 untuk sumur dan Juli 2025 untuk rig. Data sumur 2022 tidak tersedia. Sumber: Baker Hughes. (n.d.). *Rig count overview and summary count*.

gigawatt pada 2033[83] serta berpotensi meningkat lebih cepat seiring perkembangan kecerdasan buatan. PLN memperkirakan bahwa kebutuhan listrik pusat data di Indonesia dapat mencapai dua hingga tiga kali lebih tinggi dari proyeksi saat ini.[84] GeoMap menunjukkan zona panas bumi yang menjanjikan di bawah koridor utama seperti Jakarta, Purwakarta, Surabaya, Batam, dan Medan sehingga memungkinkan pembangkitan listrik behind the meter dan pendinginan berbasis panas bumi di dekat simpul serat optik dan kawasan industri. Dengan menerapkan kebijakan yang tepat dan sistem generasi berikutnya, Indonesia dapat membangun infrastruktur digital yang bersih dan andal. (Lihat rekomendasi #3 dalam Bab 7, "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia," untuk informasi lebih lanjut.)

Kemitraan dengan Industri Minyak dan Gas

Proses yang digunakan dalam industri minyak dan gas di Indonesia seperti rig pengeboran untuk eksplorasi dan eksploitasi sumur, pompa, well pad, penukar panas, dan peralatan lain memiliki banyak kesamaan dengan pengembangan energi panas bumi.[85] Kesamaan tersebut meliputi peluang untuk memanfaatkan kembali aset industri minyak dan gas seperti sensor sumur dalam, perangkat pemetaan geofisika, teknologi stimulasi reservoir, dan teknologi pengelolaan reservoir untuk mencapai batuan metamorf panas atau batuan sedimen panas bagi pengembangan generasi berikutnya.[86] Di antara seluruh teknologi energi terbarukan, panas bumi memiliki kesesuaian teknis dan kesamaan tenaga kerja yang paling kuat dengan industri minyak dan gas karena keduanya mengandalkan keahlian bawah permukaan,

praktik pengeboran, dan infrastruktur yang serupa.[87,88]

Dalam upaya meningkatkan kinerja produksi minyak dan gas, sebanyak 39 rencana pengembangan lapangan dan inisiatif serupa untuk eksplorasi dan produksi hidrokarbon disetujui pada 2023.[89] Pekerjaan berkelanjutan juga dilakukan untuk mengoptimalkan sumur pengembangan, workover, dan kegiatan pemeliharaan sumur.[90] Hingga Agustus 2025, terdapat 599 sumur pengembangan yang telah dibor oleh 28 rig minyak, 2 rig gas, dan 10 rig lainnya yang beroperasi di Indonesia.[91] Angka ini berada di luar 799 sumur yang dibor pada 2023 dan 899 sumur yang dibor pada 2024 (**Gambar 2.14**).[92] (Untuk informasi lebih lanjut mengenai panas bumi dan industri minyak dan gas, lihat Bab 5, "Dari Sumur ke Sumur: Mengoordinasikan Kelembagaan Indonesia dan Tenaga Kerja Migas untuk Transisi Panas Bumi.")

REKOMENDASI

Rekomendasi berikut dapat membantu Indonesia mengatasi berbagai hambatan yang disebutkan dalam bab ini.

Melakukan Survei dan Kajian

Melihat besarnya potensi panas dan kapasitas pembangkitan yang ditawarkan oleh teknologi panas bumi generasi berikutnya, pemerintah perlu memimpin survei langsung dan kajian ekonomi kemudian memasukkan temuan tersebut dalam edisi laporan teknologi berikutnya sebagai rujukan bagi investor.

Menjembatani Kesenjangan Kelayakan Ekonomi

Pemerintah dapat membantu menjembatani kesenjangan antara tingkat pengembalian yang diharapkan pengembang dan keterjangkauan konsumen yang dilindungi oleh tarif batas atas dengan memfasilitasi akses pembiayaan berbiaya rendah serta mekanisme dukungan seperti pendanaan kesenjangan kelayakan. Pemerintah dapat memprioritaskan proyek di wilayah yang peningkatan akses listriknya dapat mendorong pertumbuhan ekonomi. (Lihat Bab 7 "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia" untuk rekomendasi lebih lanjut.)

Strategi berikut dapat membantu menurunkan biaya pengembangan pembangkit:

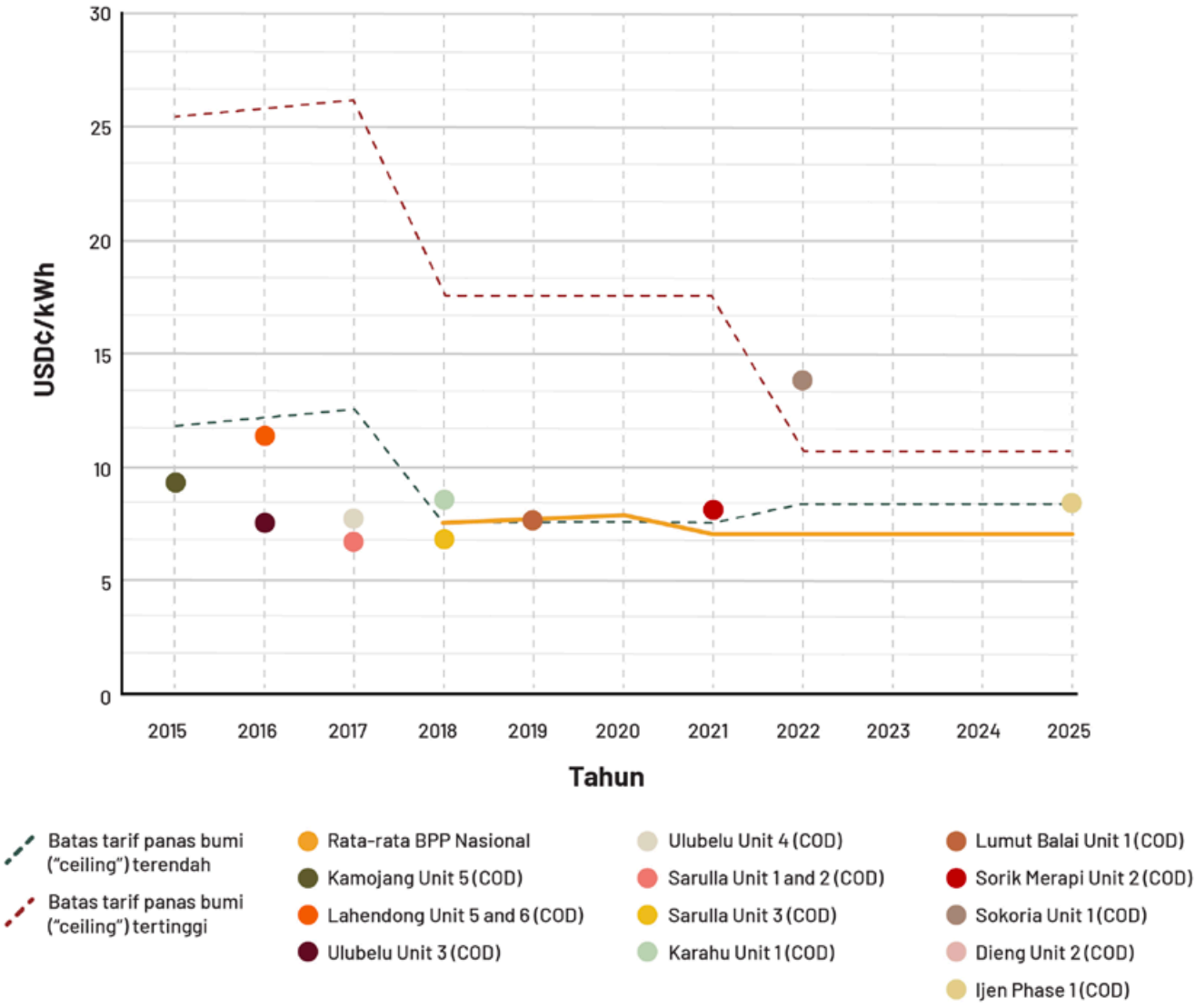
- Mengizinkan perpanjangan kontrak jangka panjang dan atau berkuantitas besar tanpa proses tender baru.
- Melaksanakan kampanye pengeboran yang luas dan berkelanjutan dalam satu Wilayah Kerja Panas Bumi.
- Memungkinkan pengembang memiliki rig pengeboran dan layanan pengeboran.

Sebuah studi global yang dilakukan oleh International Finance Corporation menemukan bahwa semakin banyak sumur yang dibor semakin tinggi tingkat keberhasilannya karena setiap sumur yang dibor meningkatkan pemahaman mengenai ukuran dan lokasi sumber daya.[93] Peningkatan jumlah program pengeboran dan kemajuan teknologi juga akan mengurangi waktu pengembangan biaya investasi dan tingkat pembiayaan. Seiring berlanjutnya eksplorasi data yang lebih kaya akan tersedia sehingga dapat membantu mendefinisikan arketipe sumber daya panas bumi dan data tersebut juga dapat digunakan untuk merancang turbin yang dapat beroperasi dalam rentang kondisi tertentu. Penerapan desain turbin uap standar bahkan hanya untuk lima unit dapat menghasilkan penghematan biaya yang signifikan.[94] Strategi ini mungkin tidak menjadi solusi tunggal tetapi analisis menunjukkan perlunya pengembangan basis data pengeboran panas bumi promosi transparansi dan pertukaran data di antara pengembang standardisasi kegiatan pengeboran dan persyaratan pelaporan serta pembaruan kajian secara berkala untuk menangkap tren dan menerapkan teknologi pengeboran terbaru. Lihat Bab 7 untuk informasi lebih lanjut tentang langkah langkah pengembangan industri dan penurunan biaya.

Menyeimbangkan pencapaian target pengembangan panas bumi dengan kebutuhan untuk mempertahankan minat investor tanpa berdampak signifikan terhadap keterjangkauan listrik tetap menjadi tantangan inti di Indonesia. Mencapai keseimbangan ini memerlukan kolaborasi erat antara pemerintah pelaku industri dan para pemangku kepentingan lainnya untuk mengatasi hambatan yang terus berulang termasuk risiko eksplorasi lamanya waktu pengembangan isu penerimaan publik dan kekurangan tenaga kerja terampil. Faktor faktor ini akan sangat menentukan kelayakan ekonomi jangka panjang proyek panas bumi di Indonesia.



TARIF PERJANJIAN JUAL BELI LISTRIK (PPA) PANAS BUMI DI BAWAH SKEMA OFFTAKE PLN



Gambar 2.15: Tarif PPA yang dilaporkan dari beberapa pembangkit listrik panas bumi yang diamankan PLN dibandingkan dengan dua rezim tarif nasional (Peraturan Menteri ESDM 17/2014 dan 50/2017) dan rata-rata biaya pokok penyediaan listrik nasional (Keputusan Menteri ESDM 1772 K/20/MEM/2018, 55 K/20/MEM/2019, dan 169.K/HK.02/MEM.M/2021). BPP = biaya pokok penyediaan listrik nasional. Sumber: Prima, B. (2019, April 25). *The investment value of the Dieng and Patuha Unit II PLTP project reached US $300 million*. Kontan; Arifenie, F. N. (2011, March 12). *PLN signs electricity PPA for six power plants*. Kontan; MedcoEnergi Geothermal. (2023). *Geothermal power plant project Ijen Bondowoso: Livelihood restoration plan*; Lesmana, A., Winofa, N. C., Pratama, H. B., Ashat, A., & Saptadji, N. M. (2020). *Preliminary financial modelling with probabilistic approach for geothermal development project in Indonesia*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 417*, 012024; Arifenie, F. N. (2012, April 29). *PLN to sign 11 geothermal PPAs. Kontan*; Meilanova, D. R. (2021, July 28). *Sorik Marapi Geothermal Power Plant Unit II is operational, saving PLN Rp100 billion per year*. Bisnis.

Tren penurunan tarif batas atas panas bumi sejalan dengan tujuan pemerintah untuk memperluas pemanfaatan energi terbarukan sekaligus menjaga keterjangkauan listrik bagi masyarakat. Namun masih terdapat kesenjangan signifikan antara tarif tersebut dan biaya pokok penyediaan listrik yang tetap sangat rendah akibat dominasi pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara bersubsidi. Biaya dasar yang rendah ini secara efektif menjadi tolok ukur harga bagi seluruh pembangkit energi terbarukan yang sedang dikembangkan. Meskipun tarif yang rendah mendukung keterjangkauan, tarif yang terlalu rendah berisiko mengurangi minat investor terutama ketika dukungan kebijakan belum memadai. Setelah diterbitkannya Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 beberapa pengembang menyampaikan kekhawatiran bahwa keuntungan investor akan menjadi sangat kecil.

KESIMPULAN

Meskipun Indonesia memiliki potensi panas bumi yang sangat besar pemanfaatannya masih sangat rendah. Dari sekitar 2.168 gigawatt total potensi panas bumi konvensional dan generasi berikutnya lihat Bab 3 "Di Dasar Kepulauan: Sistem Geotermal Konvensional Indonesia" dan lampirannya "Memperluas Cakupan: Peluang Pengembangan Geotermal Generasi Baru" hanya 2,68 gigawatt potensi konvensional yang telah dikembangkan untuk pembangkitan listrik.[95] Untuk pemanfaatan langsung Indonesia saat ini baru menghasilkan 2,37 megawatt panas meskipun memiliki potensi yang sangat besar.[96] Selain itu dalam perencanaan jangka panjang pemanfaatan panas bumi masih berfokus pada pembangkitan listrik.

Indonesia memiliki seluruh elemen untuk membangun industri panas bumi yang berkembang dan memanfaatkan sumber dayanya yang sangat besar untuk mencapai target iklim sekaligus membuka jalan baru bagi tenaga kerja domestik. Namun Indonesia berada pada titik penentu dalam ambisinya untuk mencapai net zero pada 2060. Meskipun sumber daya panas bumi melimpah tantangan struktural masih menghambat pengembangan energi terbarukan. Berbagai rencana seperti Rencana Umum Energi Nasional Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional dan Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 telah menyediakan kerangka pendukung tetapi kecepatan integrasi panas bumi tetap lambat.

Untuk menutup kesenjangan ini dan sebagaimana dijelaskan lebih lanjut dalam Bab 7 "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia" Indonesia dapat menetapkan pengembangan panas bumi sebagai prioritas nasional dalam strategi energi jangka panjangnya. Dengan potensi yang luar biasa panas bumi dapat dikembangkan tidak hanya untuk pembangkitan listrik tetapi juga untuk pemanasan industri pusat data produksi hidrogen dan berbagai bentuk pemanfaatan langsung lainnya yang dapat membuka manfaat ekonomi dan lingkungan yang luas. Dengan mempercepat pengembangan panas bumi Indonesia tidak hanya dapat mengurangi ketergantungan pada batu bara tetapi juga mewujudkan sistem energi rendah karbon yang lebih tangguh. Dalam prosesnya energi panas bumi dapat menjadi fondasi transisi energi Indonesia yang adil dan berkelanjutan memastikan ketahanan energi sekaligus selaras dengan target net-zero. Indonesia berpeluang tampil sebagai pemimpin dunia dalam teknologi dan aplikasi panas bumi generasi berikutnya.

Tarif dan PLN:
***Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tarif batas atas masih didasarkan pada kapasitas dan faktor lokasi namun dengan kisaran tarif antara 8,42 sen Amerika Serikat per kilowatt jam hingga 10,74 sen Amerika Serikat per kilowatt jam. Dalam satu dekade terakhir sebagai satu satunya pembeli listrik panas bumi PLN berhasil mengamankan perjanjian jual beli listrik untuk sejumlah proyek dengan harga sekitar 80% lebih rendah dari tarif batas atas yang berlaku dengan beberapa pengecualian (lihat* **Gambar 2.15)**.



REFERENSI

1 International Energy Agency (IEA). (2024). The future of geothermal energy. https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy

2 Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2013). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2013*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-economic-statistics-of-indonesia-2013-997ndnz.pdf

3 Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2014). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2014*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-economic-statistics-of-indonesia-2014-it06jkm.pdf

4 International Monetary Fund (IMF). (2007). *Indonesia: 2007 Article IV consultation—staff report; staff statement; public information notice on the executive board discussion; and statement by the executive director for Indonesia*. https://www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2016/12/31/Indonesia-2007-Article-IV-Consultation-Staff-Report-Staff-Statement-Public-Information-21250

5 International Monetary Fund (IMF). (2018). *Indonesia: 2017 Article IV consultation—press release; staff report; and statement by the executive director for Indonesia*. https://www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2018/02/06/Indonesia-2017-Article-IV-Consultation-Press-Release-Staff-Report-and-Statement-by-the-45614

6 International Monetary Fund (IMF). (2024). *Indonesia: 2024 Article IV consultation—press release; staff report; and statement by the executive director for Indonesia*. https://www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2024/08/07/Indonesia-2024-Article-IV-Consultation-Press-Release-Staff-Report-and-Statement-by-the-553165

7 Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2014). *Government regulation No. 79 of 2014 on national energy policy*. Government of Indonesia. https://jdih.esdm.go.id/common/dokumen-external/PP%20No.%2079%20Thn%202014%20%28Terjemahan%29.pdf

8 Arinaldo, D., & Adiatma, J. C. (2019). *Indonesia's coal dynamics: Toward a just energy transition*. Institute for Essential Services Reform. https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2019/08/Indonesias-Coal-Dynamics_Toward-a-Just-Energy-Transition.pdf

9 Analysis by IESR using data from Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2025). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-and-economic-statistics-of-indonesia-2024.pdf

10 Analysis by IESR using data from MEMR, *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*, 2025.

11 Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2025). *National Electricity General Plan 2024–2060*. Government of Indonesia. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/0b68e-250602r0-rukn-ringkas-bahan-diseminasi-.pdf

12 IEA, 2024.

13 Audit Board of Indonesia. (2007). *Law number 30 of 2007 concerning energy*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/39928/uu-no-30-tahun-2007

14 Audit Board of Indonesia. (2009). *Law number 30 of 2009 concerning electricity*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/38767

15 Rhamadanty, S. (2025, April 15). *The ups and downs of the New and Renewable Energy Bill*. Kontan. https://industri.kontan.co.id/news/maju-mundur-pengesahan-ruu-energi-baru-terbarukan

16 Institute for Essential Services Reform (IESR). (2020). *National Energy General Plan (RUEN): Existing plan, current policies implication and energy transition scenario*. https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2020/09/RUEN_29_sept_2020_Roadmapseries_report_Web.pdf

17 Audit Board of Indonesia. (2025). *Government regulation (PP) number 40 of 2025 concerning National Energy*

Policy. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/328789/pp-no-40-tahun-2025
18 Audit Board of Indonesia. (1985). *Law number 15 of 1985 concerning electricity*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/46966
19 MEMR, *National Electricity General Plan*, 2025.
20 Audit Board of Indonesia, *Government regulation (PP) number 40*, 2025.
21 Audit Board of Indonesia. (2017). *Presidential regulation (Perpres) number 22 of 2017 concerning the National Energy General Plan*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/68772
22 MEMR, *National Electricity General Plan*, 2025.
23 PT Perusahaan Listrik Negara (Persero). (2025). *Dissemination of RUPTL PLN 2025-2034: Beyond the Greenest RUPTL*. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/06524-bahan-dirut-pln.pdf
24 National Energy Council. (2025). *Energy modeling in the National Energy Policy RPP*. https://caseforsea.org/wp-content/uploads/2025/06/02-DEN_Pemodelan-Energi-dalam-RPP-KEN.pdf
25 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024, December 17). *Geothermal energy will be the mainstay of the renewable energy mix achievement by the end of 2024*. https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/panas-bumi-jadi-andalan-capaian-bauran-ebt-hingga-akhir-2024
26 MEMR, 2024.
27 MEMR, *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*, 2025.
28 MEMR, *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*, 2025.
29 Analysis by IESR using data from MEMR, *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*, 2025.
30 Sisdwinugraha, A. P., et al. (2024). *Indonesia energy transition outlook 2025: Navigating Indonesia's energy transition at the crossroads: A pivotal moment for redefining the future*. Institute for Essential Services Reform. https://iesr.or.id/pustaka/indonesia-energy-transition-outlook-ieto-2025/
31 Analysis by IESR using data from MEMR, *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*, 2025.
32 MEMR, *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*, 2025.
33 Government of Indonesia. (2024, February 27). *The manufacturing industry is the highest source of economic growth*. https://indonesia.go.id/kategori/editorial/7998/industri-pengolahan-jadi-sumber-pertumbuhan-ekonomi-tertinggi?lang=1#:~:text=Industri%20pengolahan%20juga%20menjadi%20sumber,terjadi%20pada%202023%2C%20tentu%20melegakan
34 Analysis by IESR using data from MEMR, *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*, 2025.
35 MEMR, *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2024*, 2025.
36 Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics, 90*, 101915. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915
37 Sudarman, S., Suroto, Pudyastuti, K., & Aspiyo, S. (2000). Geothermal development progress in Indonesia: Country update 1995–2000. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000*. Kyushu-Tohoku, Japan. https://worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0669.PDF
38 Nugraheny, D. E., & Ika, A. (2024, December 19). *The Ministry of Industry is developing a roadmap for industrial decarbonization, with the textile sector a priority*. Kompas.com. https://money.kompas.com/read/2024/12/19/080000126/kemenperin-susun-peta-jalan-dekarbonisasi-industri-sektor-tekstil-jadi
39 Ministry of Industry, WRI Indonesia, & Institute for Essential Services Reform (IESR). (2025). *Decarbonization roadmap: 9 national industrial sub-sectors*. https://drive.google.com/file/d/1wD7FjhP4PGrG5OL4B2cFNJkiTtL9-9eP/view
40 IEA, 2024.
41 MEMR, *National Electricity General Plan*, 2025.



42 MEMR, *National Electricity General Plan*, 2025.

43 Several assumptions were made for the estimate: (i) Capacity factor was assumed at 80%, quoted from Ea Energy Analyses. (2024). *Technology data for the Indonesian power sector 2024: Catalogue for generation and storage of electricity*. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/c4d42-technology-data-for-the-indonesian-power-sector-2024-annoteret-af-kb-.pdf). (ii) Total generation for the higher geothermal capacity scenario was kept the same as in the total generation of MEMR, *National Electricity General Plan*, 2025. This was done by reducing the generation from coal.

44 Indonesia Investments. (2025, September 18). *Geothermal energy in Indonesia—why is it difficult to tap huge potential?* https://www.indonesia-investments.com/business/business-columns/geothermal-energy-in-indonesia-why-is-it-difficult-to-tap-huge-potential/item9859

45 Analysis by IESR using data from the Ministry of Energy and Mineral Resources. (2021). *Renewable energy potential per province*. Government of Indonesia.

46 Analysis by IESR using data from Perusahaan Listrik Negara. (2025). *Statistics PLN 2024*. https://web.pln.co.id/statics/uploads/2025/07/Statistik-PLN-2024-Audited-Indo-Eng-Final-Compressed-update-sheet.pdf

47 Perusahaan Listrik Negara (PLN). (2025). *Dissemination of PLN's RUPTL 2025–2034*. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/06524-bahan-dirut-pln.pdf

48 PLN, 2025.

49 PLN, 2025.

50 Hartono, I. N., Setiawan, A. D., Hidayatno, A., & Dewi, M. P. (2023). Uncertainty analysis of geothermal development projects using exploratory system dynamics modelling and analysis method. *International Journal of Technology, 14*(7), 1537–1547. https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i7.6675

51 Kabeyi, M. J. B., Oludolapo, A. O., & Teresa, H. (2020). Characteristics and applications of geothermal wellhead powerplants in electricity generation. In *SAIIE31 Proceedings*. South Africa. https://www.researchgate.net/



publication/348575264_Virtual_event

52 Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2020). Viability of wellhead power plants as substitutes of permanent power plants. In *Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Harare, Zimbabwe. https://www.ieomsociety.org/harare2020/papers/77.pdf#:~:text=The%20study%20showed%20that%20the%20wellhead%20power%20plants,but%20still%20competitive%20compared%20to%20wind%20and%20solar

53 Pambudi, N. A., & Ulfa, D. K. (2024). The geothermal energy landscape in Indonesia: A comprehensive 2023 update on power generation, policies, risks, phase and the role of education. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *189*, 114008. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114008

54 Lesmana, A., Winofa, N. C., Pratama, H. B., Ashat, A., & Saptadji, N. M. (2020). Preliminary financial modelling with probabilistic approach for geothermal development project in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 417*, 012024. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/417/1/012024

55 Akar, S., Augustine, C., Kurup, P., & Mann, M. (2018). *Global value chain and manufacturing analysis on geothermal power plant turbines*. National Renewable Energy Lab. https://docs.nrel.gov/docs/fy18osti/71128.pdf

56 Akar, S., Augustine, C., & Kurup, P. (2021). Global value chain and manufacturing analysis on geothermal power plant turbines. In C. O. Colpan, M. A. Ezan, & O. Kizilkan (Eds.), *Thermodynamic analysis and optimization of geothermal power plants* (pp. 17–41). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821037-6.00007-X

57 Buzăianu, A., Csaki, I., Moţoiu, P., Leósson, K., Serghiuţă, S., Arnbjornsson, A., Moţoiu, V., Popescu, G., Guðlaugsson, S., & Guðmundsson, D. (2016). Some analysis of major impact of geothermal fluid components in power plant equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 133*, 012043. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/133/1/012043

58 Finster, M., Clark, C., Schroeder, J., & Martino, L. (2015). Geothermal produced fluids: Characteristics, treatment technologies, and management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50*, 952–966. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.059

59 Purwanto, E. H., Suwarno, E., Hakama, C., Pratama, A. R., & Herdiyanto, B. (2021). An updated statistic evaluation of drilling performance, drilling cost and well capacity of geothermal fields in Indonesia. In *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland. https://www.researchgate.net/publication/353769129_An_Updated_Statistic_Evaluation_of_Drilling_Performance_Drilling_Cost_and_Well_Capacity_of_Geothermal_Fields_in_Indonesia

60 Erichatama, N., Purba, D., Adityatama, D. W., & Al Asy'ari, M. R. (2024). Geothermal drilling cost landscape in Indonesia: Cost trend, outlier cost, and drilling cost component. In *Proceedings the 10th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE) 2024*. Indonesia. https://www.researchgate.net/publication/384893972_Geothermal_Drilling_Cost_Landscape_in_Indonesia_Cost_Trend_Outlier_Cost_and_Drilling_Cost_Component

61 His Muhammad Bintang. (2023). *Making energy transition succeed: A 2023's update on the levelized cost of electricity (LCOE) and levelized cost of storage (LCOS)*. Institute for Essential Services Reform. https://iesr.or.id/en/pustaka/making-energy-transition-succeed-a-2023s-update-on-the-levelized-cost-of-electricity-lcoe-and-levelized-cost-of-storage-lcos/

62 Ea Energy Analyses. (2017). *Technology data for the Indonesian power sector: Catalogue for generation and storage of electricity*. https://www.ea-energianalyse.dk/wp-content/uploads/2020/02/1724_technology_data_indonesian_power_ector_dec2017-2.pdf

63 Ea Energy Analyses. (2021). *Technology data for the Indonesian power sector: Catalogue for generation and storage of electricity*. https://www.ea-energianalyse.dk/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Data-for-the-Indonesian-Power-Sector-final-1.pdf



64 Ea Energy Analyses, 2024.
65 Lesmana et al., 2020.
66 Ea Energy Analyses. (2021). *Technology data for the Indonesian power sector: Catalogue for generation and storage of electricity.* https://www.ea-energianalyse.dk/en/publications/technology-data-for-the-indonesian-power-sector/
67 IEA, 2024, p. 80.
68 IEA, 2024, p. 82.
69 IEA, 2024, p. 85.
70 Purba, C. (2025, July 4). *Govt drafts new regulation to streamline geothermal development*. Petromindo. https://www.petromindo.com/news/article/govt-drafts-new-regulation-to-streamline-geothermal-development
71 Directorate General of New and Renewable Energy and Energy Conservation. (2025, July 3). *Public consultation on the draft amendment to Government Regulation No. 7 of 2017* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=nA-8IMX3kP8&t=8418s
72 Audit Board of Indonesia. (2022). *Presidential regulation (Perpres) number 112 of 2022 concerning the acceleration of renewable energy development for electricity supply.* Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/225308/perpres-no-112-tahun-2022
73 Audit Board of Indonesia, 2022.
74 Assegaf Hamzah & Partners. (2022, September 23). *Client update: Indonesia—Presidential regulation 112: Indonesia's commitment to renewable energy.* https://www.ahp.id/clientalert/AHPClientUpdate-23September2022.pdf
75 Assegaf Hamzah & Partners, 2022.
76 Audit Board of Indonesia. (2025). *Regulation of the Minister of Energy and Mineral Resources number 10 of 2025 concerning the roadmap for energy transition in the electricity sector.* Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/317729/permen-esdm-no-10-tahun-2025
77 Garrison, G., Uddenberg, M., Cladouhos, T., Petty, S., & Coleman, T. (2013). An assessment of engineered geothermal systems for water management and power production. *GRC Transactions, 37,* 155–164. https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1030564.pdf
78 Project InnerSpace. (n.d.). *GeoMap*. https://geomap.projectinnerspace.org/geomap/
79 Directorate General of New Renewable Energy and Energy Conservation. (2025). *National hydrogen and ammonia roadmap*. Ministry of Energy and Mineral Resources, Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-peta-jalan-hidrogen-dan-amonia-nasional.pdf
80 Hamlehdar, M., Beardsmore, G., & Narsilio, G. A. (2024). Hydrogen production from low-temperature geothermal energy–A review of opportunities, challenges, and mitigating solutions. *International Journal of Hydrogen Energy,* 77, 742–768. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.104
81 Kamojang Energy. (n.d.). *Hydrogen of things*. PLN Indonesia Power.
82 King, B., Ricks, W., Pastorek, N., & Larsen, J. (2025, March 11). *The potential for geothermal energy to meet growing data center electricity demand*. Rhodium Group. https://rhg.com/wp-content/uploads/2025/03/The-Potential-for-Geothermal-Energy-to-Meet-Growing-Data-Center-Electricity-Demand.pdf
83 Valqa, A. (2024, September 11). *Data center electricity demand to reach 12 gigawatts in 2033*. D'Expert. https://www.dexpert.co.id/kebutuhan-listrik-data-center-di-2033-tembus-12-gigawatt
84 Valqa, 2024.
85 IEA, 2024.
86 Morgan, S. (2023). *Oil and gas technology and geothermal energy development*. Congressional Research Service. https://www.congress.gov/crs-product/R47405

87 International Renewable Energy Agency. (2021). *Geothermal: The solution underneath: The value of geothermal for a clean energy transition*. Global Geothermal Alliance. https://globalgeothermalalliance.org/-/media/Files/IRENA/GGA/Publications/Geothermal—-The-Solution-Underneath.pdf

88 International Energy Agency (IEA). (2024). Overview of synergies between the oil and gas and geothermal industries. In IEA, *The future of geothermal energy*. https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy/overview-of-synergies-between-the-oil-and-gas-and-geothermal-industries

89 IEA, *Overview of synergies*, 2024.

90 IEA, *Overview of synergies*, 2024.

91 Baker Hughes. (n.d.). *Rig count overview and summary count*. https://rigcount.bakerhughes.com/

92 Rinaldi, R. (2025, July 14). *Oil & gas sector sees surge in development drilling amid energy security push*. Indonesia Business Post. https://indonesiabusinesspost.com/4740/energy-and-resources/oil-gas-sector-sees-surge-in-development-drilling-amid-energy-security-push

93 Avato, P. (2013). *Success of geothermal wells: A global study*. International Finance Corporation, World Bank Group. https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/1-Patrick%20Avato.pdf

94 Akar et al., 2018.

95 Antara News. (2025, April 14). *Govt aims to increase installed geothermal capacity by 5.2 GW*. https://en.antaranews.com/news/351665/govt-aims-to-increase-installed-geothermal-capacity-by-52-gw

96 Lund & Toth, 2021.





Lapangan produksi panas bumi Lahendong, PT Pertamina Geothermal Energy (Tbk), dan pabrik gula semut berbahan bakar panas bumi

Bab 3, Bagian 1

Di Dasar Kepulauan: Sistem Geotermal Konvensional Indonesia

Pri Utami, Kartika Palupi Savitri, dan Yan Restu Freski, Universitas Gadjah Mada

Di balik kerangka geologi Indonesia yang kompleks, tersimpan spektrum potensi energi panas bumi yang luas dan sebagian besar belum dimanfaatkan. Mulai dari zona superpanas di kedalaman, cekungan sedimen pembawa panas, hingga formasi granit radiogenik, wilayah subpermukaan Indonesia menawarkan beragam peluang pemanfaatan yang jauh melampaui teknologi geotermal konvensional yang digunakan saat ini.

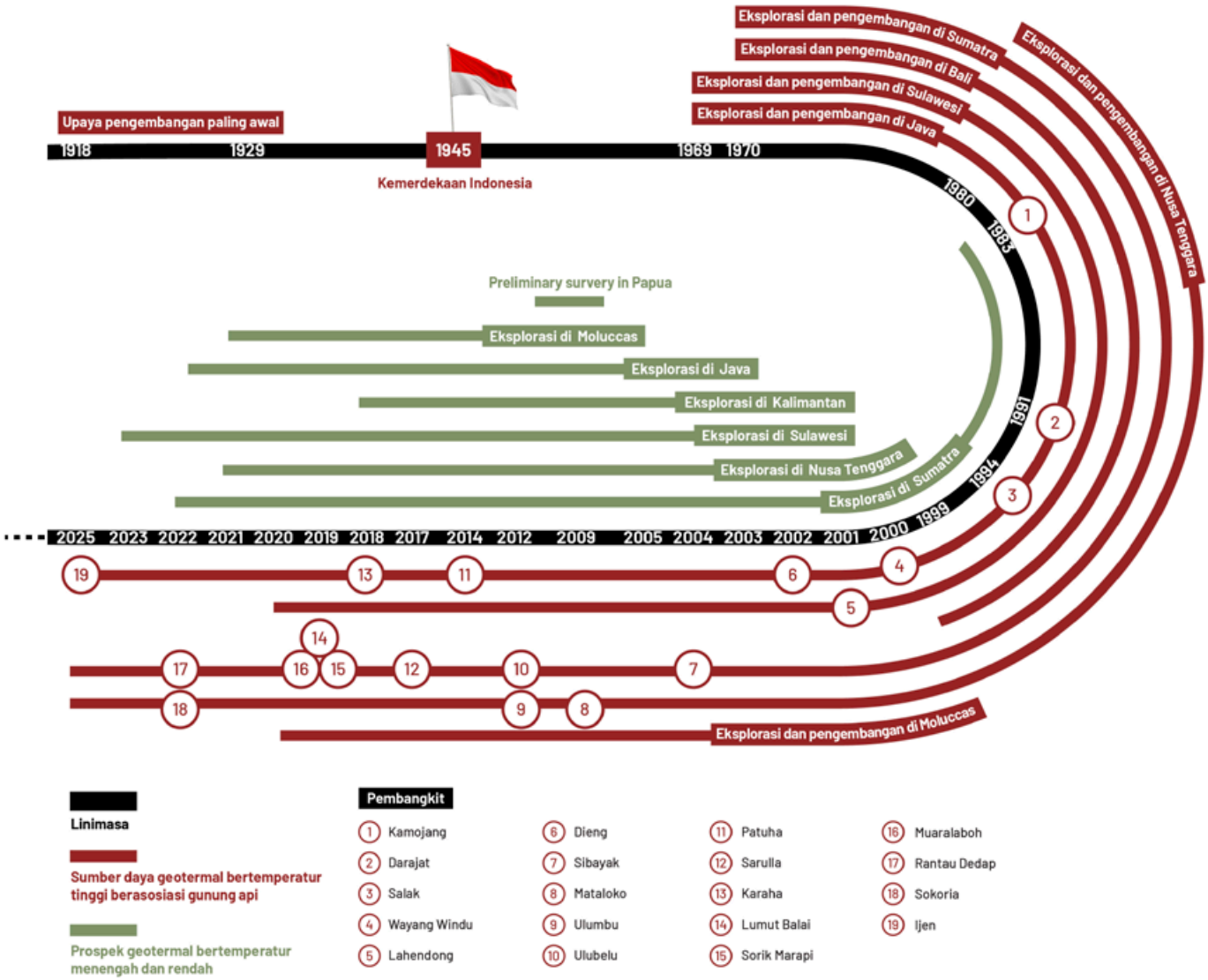
Tidak ada tempat yang lebih baik untuk mengamati besarnya potensi energi panas bumi selain di sepanjang Cincin Api (*Ring of Fire*), zona tektonik aktif yang ditandai dengan deretan gunung api dan aktivitas seismik yang tinggi. Kepulauan Indonesia, yang merupakan bagian paling barat dari Cincin Api, dianugerahi prospek geotermal yang melimpah. Gradien geotermal di wilayah ini melebihi 30°C per kilometer, jauh di atas rata-rata benua secara global.

Upaya awal untuk mengembangkan sumber daya panas bumi Nusantara dilakukan oleh pemerintah kolonial Belanda, yang mulai mengeksplorasi area fumarola di Kamojang (Jawa Barat) pada tahun 1918[1]. Setelah kemerdekaan pada tahun 1945, Indonesia mulai mengeksplorasi potensi geotermal di seluruh wilayahnya, dengan fokus utama pada sumber daya bertemperatur tinggi yang memperlihatkan pelepasan panas bawah permukaan signifikan akibat aktivitas vulkanik muda ke permukaan. (**Gambar 3.1**).[2,3,4] Sejak tahun 1980-an, pemerintah juga memperluas fokus eksplorasi ke prospek bertemperatur sedang dan rendah yang tidak selalu berada di wilayah vulkanik aktif.

Saat ini, Indonesia merupakan salah satu pemimpin dunia dalam pengembangan panas bumi, dengan kapasitas listrik geotermal yang melampaui hampir seluruh negara lain. Hingga tahun 2025, Indonesia memiliki 19 lapangan geotermal bertemperatur tinggi yang beroperasi secara komersial, dengan kapasitas terpasang konvensional sebesar 2.653 megawatt listrik[5]. Kapasitas tersebut menempatkan Indonesia sebagai produsen listrik



LINIMASA PENGEMBANGAN PANAS BUMI INDONESIA



Gambar 3.1: Tonggak pengembangan geotermal Indonesia dan tahun beroperasinya pembangkit listrik tenaga panas bumi.. Sumber: Radja, V. T. (1975). *Overview of geothermal energy studies in Indonesia*. Dalam *Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*. United Nations; Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2008). *History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000*. Geothermics, 37(3), 220–266; Ministry of Energy and Mineral Resources. (2023). *Profile of Indonesia's geothermal potential: Volumes 1 and 2*. Directorate of Geothermal, Directorate of New, Renewable Energy, and Energy Conservation, Ministry of Energy and Mineral Resources, Republic Indonesia; Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Exploration activities by geothermal permit holder business entities* [Presentation]. Dipublikasikan dengan izin.

geotermal terbesar kedua di dunia (lihat **Gambar 3.2**). Seluruh kapasitas geotermal Indonesia hingga saat ini berasal dari sistem hidrotermal konvensional, yaitu reservoir panas, air, dan permeabilitas yang terbentuk secara alami—umumnya berasosiasi dengan sistem vulkanik—dan terletak relatif dekat dari permukaan. Sistem-sistem tersebut digolongkan sebagai konvensional karena bergantung pada karakteristik dekat permukaan tersebut, berbeda dengan enhanced atau engineered geothermal systems yang memerlukan rekayasa untuk menciptakan jalur aliran fluida pada batuan panas kering. (Lihat Geotermal 101: Ikhtisar Teknologi dan Pemanfaatannya). Kapasitas 2.653 MW listrik tersebut hanyalah sebagian kecil dari total potensi geotermal konvensional Indonesia, yang diperkirakan mencapai sekitar 23,7 gigawatt listrik oleh Kementerian

Energi dan Sumber Daya Mineral pada tahun 2025[6]. Estimasi tersebut mencakup sumber daya spekulatif, hipotetik, hingga cadangan terbukti, terutama dalam sistem geotermal hidrotermal.

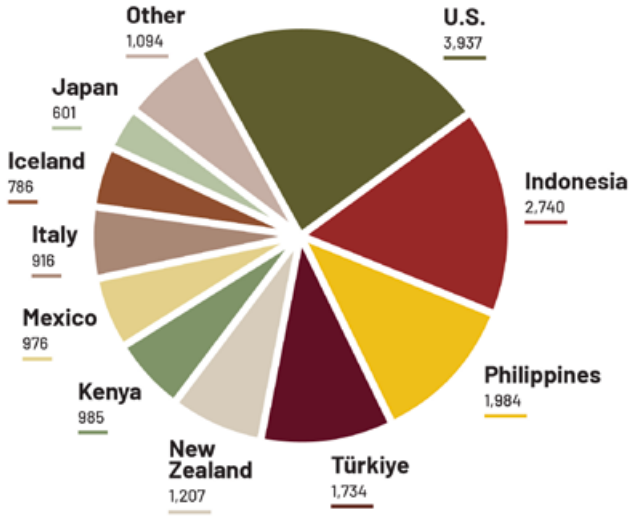
Pembahasan mengenai sumber daya tambahan yang dapat dikembangkan melalui teknologi geotermal generasi berikutnya disajikan dalam, Bagian 2, Memperluas Cakupan: Peluang Pengembangan Geotermal Generasi Baru pada bab ini.

Dengan kata lain, seperti dibahas pada bagian-bagian selanjutnya dalam bab ini, Indonesia memiliki peluang yang sangat besar untuk mengembangkan sumber daya geotermal di luar sistem hidrotermal konvensional. Teknologi generasi berikutnya memanfaatkan teknologi migas untuk membawa panas bumi ke permukaan sebagai sumber pembangkit listrik maupun sebagai aplikasi pemanas dan pendingin. Mengingat bentang geologi Indonesia yang sangat beragam, pengembangan geotermal mencakup seluruh tipe sumber daya geotermal, tanpa bergantung pada temperatur maupun lokasi—baik *onshore* maupun offshore—selama masih berada dalam Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) Indonesia yang membentang hingga 200 mil laut dari garis pantai.

Bab ini membahas besarnya potensi pengembangan geotermal Indonesia dan mengidentifikasi lokasi-lokasi yang memerlukan kajian lebih lanjut secara spesifik. Dengan meningkatnya kebutuhan energi serta komitmen nasional terhadap kemandirian energi dan pencapaian 100% energi terbarukan, riset yang proaktif akan membantu Indonesia membuka sumber daya baru dan memperkuat ketahanan energi berkelanjutan di masa depan.

Potensi prospek geotermal di luar sistem hidrotermal vulkanogenik dianalisis melalui pendekatan integratif terhadap kondisi geologi dan data geofisika regional, termasuk peta gradien geotermal. Apabila tersedia, data tersebut diperkuat oleh data temperatur hasil pengeboran geotermal maupun pengeboran migas, serta kegiatan lapangan tambahan untuk memvalidasi parameter geologi tertentu. Bab ini juga memuat contoh-contoh eksplorasi lapangan dari negara-negara yang memiliki karakter geologi serupa. Pada bagian akhir, kami juga melakukan penilaian kualitatif terhadap Tingkat Kesiapan Teknologi (*Technology Readiness Level*/TRL) untuk masing-masing sistem geotermal.

KAPASITAS TERPASANG GLOBAL (MWE): 10 BESAR NEGARA PENGHASIL LISTRIK PANAS BUMI



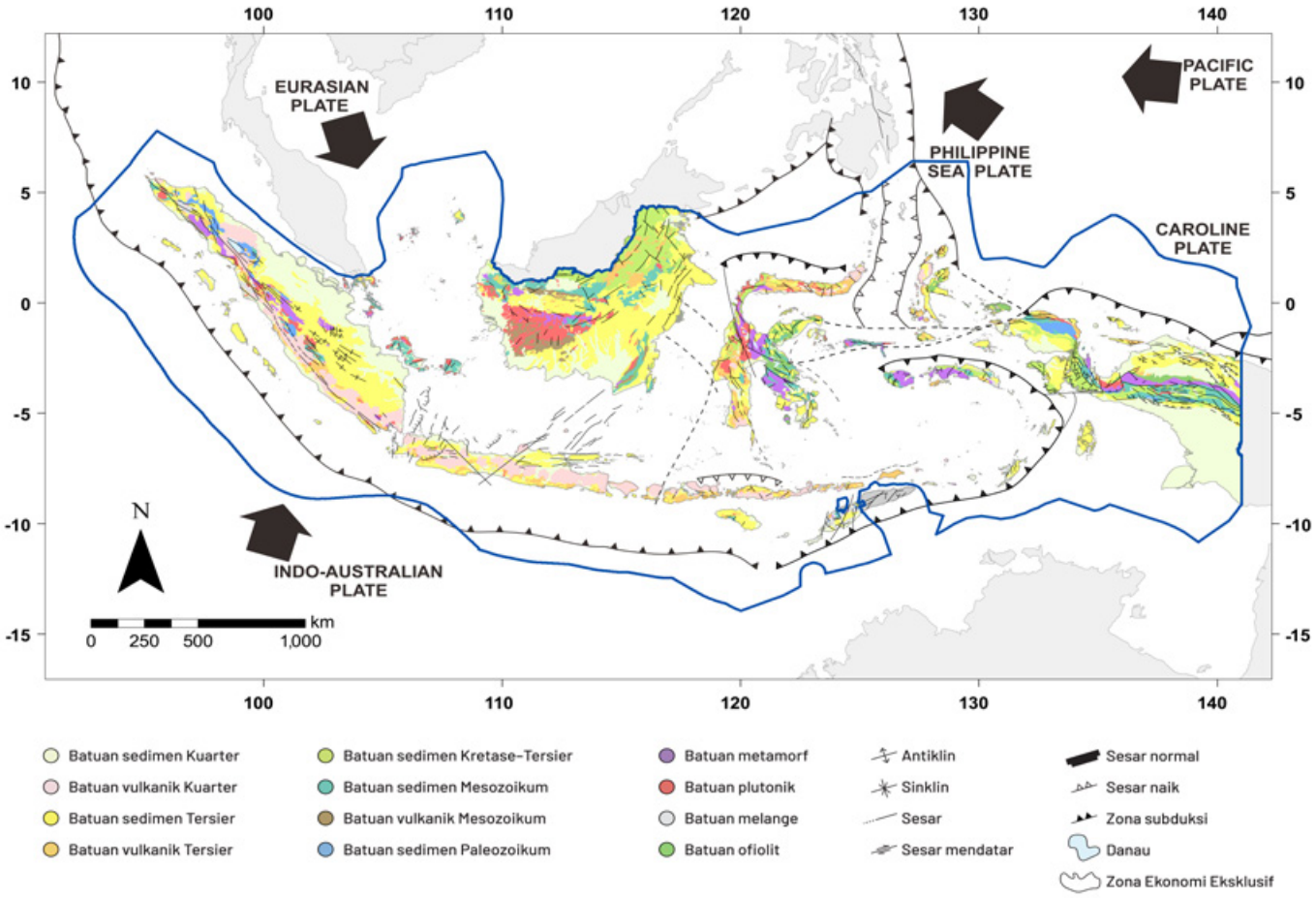
Gambar 3.2: Kapasitas terpasang geotermal menunjukkan bahwa Indonesia menempati peringkat kedua di dunia dalam produksi listrik panas bumi, namun berada di peringkat ke-74 untuk pemanfaatan langsung sumber daya geotermal. MWe = megawatt listrik. Diadaptasi dari Al Asy'ari, M. R., Adityatama, D. W., Brilian, V. A., Erichatama, N., & Purba, D. (2024). *Beyond electricity: Geothermal direct use business models and potential applications in Indonesia*. In *Proceedings of the 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States; Cariaga, C. (2025, January 20). *ThinkGeoEnergy's top 10 geothermal countries 2024-power*. ThinkGeoEnergy.

GEOLOGI INDONESIA SECARA RINGKAS

Kompleksitas geologi Indonesia berkaitan dengan posisinya yang unik dalam lanskap tektonik Bumi. Wilayah ini dipengaruhi oleh interaksi tiga lempeng tektonik besar—Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik—serta beberapa lempeng lebih kecil seperti Lempeng Caroline dan Lempeng Laut Filipina (**Gambar 3.3**).[7,8]

Konfigurasi tektonik tersebut mencerminkan evolusi geologi yang panjang dan dinamis. Dalam rentang sekitar 160 juta tahun terakhir, kawasan Indonesia dibentuk oleh pergerakan tektonik yang berlangsung secara berselang, menghasilkan penutupan samudra purba dan akresi bertahap fragmen-fragmen benua[9].

PETA GEOLOGI INDONESIA



Gambar 3.3: Peta geologi Indonesia yang menunjukkan batas-batas utama lempeng tektonik, satuan batuan, dan struktur geologi. Sumber: Sukamto, R. (2010). *Regional geological map (D. Sukarna, Ed.)*. Ministry of Energy and Mineral Resources, Republic of Indonesia; Sukamto, R., Ratman, N., & Simandjuntak, T. O. (Eds.). (2011). Geological map of Indonesia. Ministry of Energy and Mineral Resources, Republic of Indonesia; Macpherson, C. G., & Hall, R. (2002). *Timing and tectonic controls in the evolving orogen of SE Asia and the western Pacific and some implications for ore generation*. *Geological Society, London, Special Publications, 204*, 49–67; Setiawan, N. I., Osanai, Y., Nakano, N., Adachi, T., Yonemura, K., Yoshimoto, A., Setiadji, L. D., Mamma, K., & Wahyudiono, J. (2012). *Geocehmical characteristic of metamorphic rocks from South Sulawesi, Central Java, South and West Kalimantan in Indonesia*. *ASEAN Engineering Journal, 3*(1), 107–127; Simandjuntak, T. O., & Barber, A. J. (1996). *Contrasting tectonic styles in the Neogene orogenic belts of Indonesia*. *Geological Society, London, Special Publications, 106*, 185–201; Raharjo, P., Mellawati, J., & SBS, Y. (2016). *Analysis of supposed capable faults as supporting data for the proposed site of the Bojonegara Nuclear Power Plant, Banten Province*. *Journal of Nuclear Energy Development, 18*, 39–48; Flanders Marine Institute. (2025). *MarineRegions.org*.

Sekitar 45 juta tahun yang lalu, pergerakan Lempeng Australia ke arah utara kembali aktif dan memicu terjadinya subduksi di bawah Busur Sunda, suatu proses yang masih berlangsung hingga saat ini. Litosfer yang tersubduksi di sebagian besar wilayah Indonesia berasal dari masa Cretaceous atau lebih tua, kecuali pada bagian paling barat Busur Sunda, tempat kerak samudra berumur Cenozoic tersubduksi dalam kurun waktu 20 juta tahun terakhir.[9]

Interaksi kompleks antarlempeng tersebut membentuk beragam fitur geologi, termasuk palung laut dalam, sesar naik dan sesar mendatar, busur vulkanik, cekungan sedimen, serta terrane terakresi. Beragam satuan batuan yang dihasilkan berkontribusi pada keragaman lanskap geotermal Indonesia, mulai dari intrusi batuan beku hingga berbagai jenis batuan sedimen dan metamorf. Lanskap ini mencakup sistem vulkanik bertemperatur tinggi sepanjang busur aktif, serta sumber daya geotermal non-vulkanik yang dibahas pada bagian berikutnya.

SUMBER DAYA GEOTERMAL INDONESIA

Sumber daya geotermal merupakan energi panas yang tersimpan di kerak bumi pada suatu wilayah (diukur dari temperatur rerata tahunan permukaan) dan dapat diekstraksi secara ekonomis pada waktu tertentu di masa depan. Sumber daya ini diklasifikasikan sebagai "ekonomis" atau "sub-ekonomis" sesuai kondisi pada saat penilaiannya.[10] Sumber daya geotermal berada dalam suatu sistem geotermal, yaitu konfigurasi alami di dalam kerak bumi yang memungkinkan panas disimpan, ditransfer, dan diekstraksi untuk keperluan energi.

Berdasarkan pemahaman mengenai lingkungan geologi dan didukung oleh data geofisika regional serta, jika tersedia, data temperatur sumur, kami mengidentifikasi dan mengkaji sedikitnya lima jenis sumber daya geotermal di Indonesia:

1. Sumber daya geotermal tipe hidrotermal yang berasosiasi dengan gunung api (Di daratan dan di bawah laut)

2. Sumber daya geotermal superkritis sub-vulkanik (Di daratan dan di bawah laut)

3. Sumber daya geotermal radiogenik pada batuan granit: hidrotermal dan hot dry rock (HDR) (Di daratan dan di bawah laut)

4. Sumber daya geotermal pada batuan sedimen (Di daratan dan di bawah laut)

5. Sumber daya geotermal pada batuan metamorf (Di daratan)

Kelima jenis sumber daya tersebut diklasifikasikan berdasarkan litologi inang, lingkungan geologi, temperatur, serta keberadaan atau ketiadaan fluida dalam sistem (**Gambar 3.4**). Meskipun sebagian masih belum teridentifikasi atau memiliki tingkat keyakinan geologi yang rendah, seluruhnya dianggap dapat diakses melalui pengeboran dan berpotensi untuk dikembangkan sebagai sumber energi di masa mendatang.

SUMBER DAYA GEOTERMAL TIPE HIDROTERMAL BERASOSIASI GUNUNG API (DARATAN DAN BAWAH LAUT)

Laporan mengenai keberadaan gunung api dan ventilasi hidrotermal, baik di daratan maupun di bawah laut, pertama kali dihimpun dalam *A Catalog of Active Volcanoes of the World* oleh Neumann van Padang pada tahun 1959. Pembaruan data, termasuk pemantauan aktivitas vulkanik secara real time, kini dilakukan dan dipublikasikan oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) Indonesia.[11]

Sumber Daya Geotermal Tipe Hidrotermal Berasosiasi Gunung Api di Daratan

Sumber daya geotermal tipe hidrotermal pada lingkungan vulkanik telah lama menjadi fokus pengembangan di Indonesia. Sistem ini umumnya berupa reservoir batuan beku yang mengandung fluida hidrotermal, sebagian besar berasal dari air hujan yang telah dipanaskan, baik dengan ataupun tanpa kontribusi panas magmatik secara langsung. Sistem tersebut umumnya ditutupi oleh lapisan lempung hidrotermal yang bersifat impermeabel. Sistem bertemperatur tinggi sering menunjukkan manifestasi permukaan yang melimpah, seperti fumarola, mata air panas, tanah beruap, serta zona alterasi hidrotermal.



JENIS-JENIS SUMBER DAYA PANAS BUMI DI INDONESIA

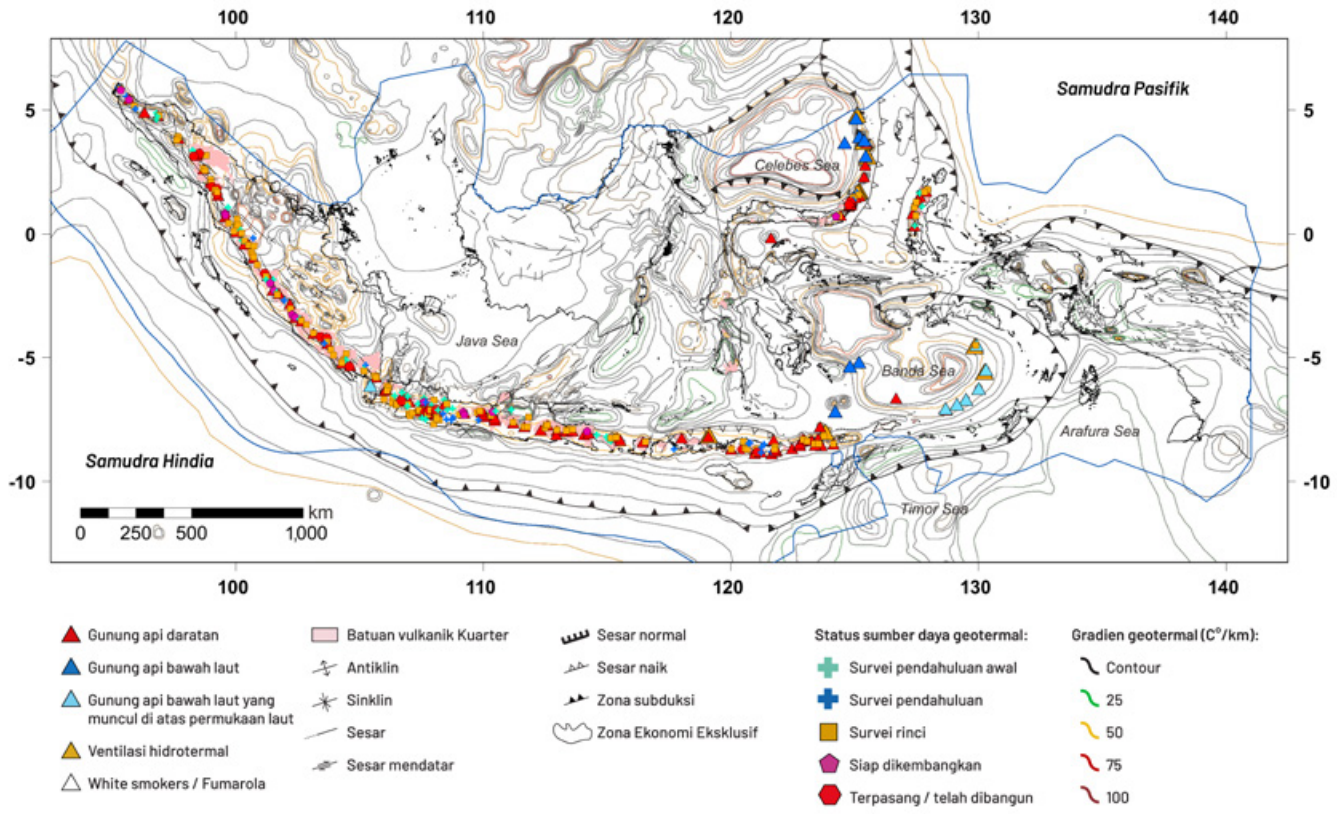
No.	Jenis Sumber Daya Geotermal	Kawasan Geologi	Lingkungan dan Lokasi Prospektif	Kelas Temperatur	Fluida
1	Hidrotermal berasosiasi gunung api	Jalur vulkanik aktif	Daratan: Sumatra, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Maluku, Sulawesi Utara Bawah laut: Perairan Sabang, Busur Sangihe, Laut Banda	Tinggi, sedang, rendah	Hidrotermal, dengan atau tanpa jejak fluida magmatik
2	Superkritis sub-vulkanik	Kawasan di bawah jalur vulkanik aktif	Daratan: Sumatra, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Maluku, Sulawesi Utara Bawah laut: Perairan Sabang, Busur Sangihe, Laut Banda	Ultra-tinggi	Fluida superkritis
3	Geotermal radiogenik berasosiasi batuan granit **hidrotermal**	Sabuk granit timah Provinsi granit	Daratan dan bawah laut: Bangka dan Kepulauan Riau Daratan: Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, Nusa Tenggara Timur, Halmahera, Kepulauan Sula, Papua	Sedang, rendah	Hidrotermal
	Geotermal radiogenik berasosiasi batuan granit **hot dry rock (HDR)**	Sabuk granit timah Provinsi granit	Daratan dan bawah laut: Bangka dan Kepulauan Riau Daratan: Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, Nusa Tenggara Timur, Halmahera, Kepulauan Sula, Papua	Sedang, rendah	Fluida sangat sedikit atau tidak ada
4	Berasosiasi batuan sedimen	Cekungan sedimen	Daratan, dipengaruhi magmatik: Sumatra, Jawa bagian utara Daratan, hot sedimentary aquifer: Sumatra, Jawa, Kalimantan, Natuna, Sulawesi, Papua bagian utara	Sedang, rendah	Fluida termal asin
5	Berasosiasi batuan metamorf	Provinsi metamorf	Bawah laut: Timur Sumatra, Kepulauan Riau, Laut Jawa Utara, Selat Malaka Daratan: Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, Sula, Buru, Seram, Papua	Sedang, rendah	Hidrotermal dengan kontribusi metamorf; fluida kemungkinan sedikit

Gambar 3.4: Ringkasan jenis-jenis sumber daya geotermal di Indonesia. Sumber: penulis, berdasarkan informasi yang disajikan dalam Bab 2.

Berdasarkan inventarisasi tahun 2023 oleh Badan Geologi Indonesia, terdapat 336 lokasi prospek geotermal tipe hidrotermal di daratan sepanjang jalur vulkanik Indonesia. Sebanyak 94 di antaranya diklasifikasikan sebagai bertemperatur tinggi.[12] Saat ini, 19 lapangan dari tipe sumber daya ini telah beroperasi sebagai penghasil listrik (lihat **Gambar 3.5**).

Selain prospek dengan manifestasi permukaan yang jelas, terdapat pula prospek yang manifestasinya terbatas atau bahkan tidak tampak. Situasi seperti ini dapat menggambarkan bagian dari suatu sistem dalam yang memiliki aliran lateral jarak jauh, seperti pada Lapangan Geotermal Cisolok–Cisukarame,[13] atau sistem yang mulai meredup sehingga suplai panas atau





Gambar 3.5: Peta yang menunjukkan sebaran gunung api daratan (Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, 2021) dan gunung api bawah laut; ventilasi hidrotermal (Abbott et al., 2024; Aryanto et al., 2023; Kurnio et al., 2015; Špičák et al., 2013); sumber daya hidrotermal berasosiasi gunung api yang telah diketahui maupun yang masih kurang tereksplorasi (Indonesian Geological Agency, 2023); gradien geotermal (Darman, 2021); batuan vulkanik Kuarter (Sukamto, 2010); struktur geologi regional utama (Raharjo et al., 2016; Sukamto et al., 2011); serta batas Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) Indonesia (Flanders Marine Institute, n.d.). Informasi referensi lengkap disajikan pada bagian akhir bab ini.

energi yang dilepaskan ke permukaan terus menurun dari waktu ke waktu.

Sumber Daya Geotermal Tipe Hidrotermal Berasosiasi Gunung Api Bawah Laut

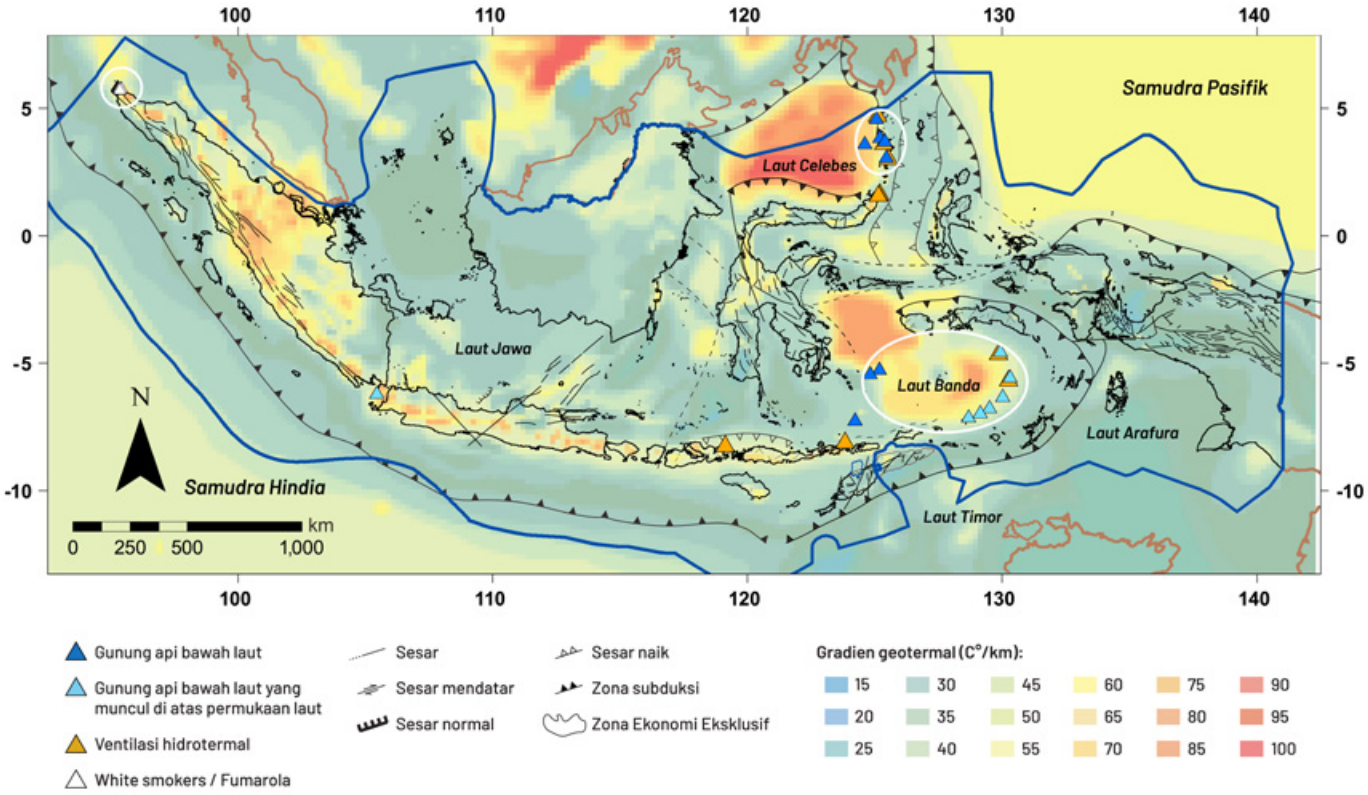
Sumber daya geotermal bawah laut menyimpan energi yang sangat besar dan belum dimanfaatkan, dengan potensi signifikan untuk menyediakan pasokan energi berkelanjutan. Sistem geotermal hidrotermal yang berasosiasi dengan gunung api bawah laut memiliki karakteristik yang serupa dengan sistem di daratan, tetapi menawarkan potensi energi yang jauh lebih besar. Karena potensi tersebut, sumber daya ini semakin menarik perhatian sebagai kandidat yang menjanjikan untuk diekstraksi sebagai energi.[14,15] Meskipun sistem geotermal bawah laut masih kurang dipelajari, eksplorasi awal yang dijelaskan dalam bagian ini menunjukkan besarnya potensi yang dapat dikembangkan.

Berdasarkan keberadaan gunung api bawah laut dan ventilasi hidrotermal, serta gradien geotermal yang tinggi (**Gambar 3.6**), sedikitnya terdapat tiga zona utama yang berpotensi untuk pengembangan sumber daya:

1. **Pulau Weh**, yang terletak di bagian barat Kepulauan Indonesia, memiliki Sistem Geotermal Jaboi, sebuah sistem hidrotermal berasosiasi gunung api di daratan yang juga menunjukkan aktivitas fumarola bawah laut, mengindikasikan keberadaan potensi geotermal di bawah permukaan laut. Kedalaman perairan di daerah tersebut mencapai sekitar 0,5 kilometer dengan gradien geotermal relatif tinggi, berkisar antara 50°C hingga 60°C per kilometer. Studi oleh Kurnio et al.[16,17] meneliti transportasi dan pengayaan unsur tanah jarang di sekitar ventilasi fumarola tersebut.



DISTRIBUSI GUNUNG API BAWAH LAUT DAN VENTILASI HIDROTERMAL



Gambar 3.6: Peta yang menunjukkan sebaran gunung api bawah laut dan ventilasi hidrotermal (Abbott & Rubenstone, 2024; Aryanto et al., 2023; Kurnio et al., 2015; Špičák et al., 2013), dilapiskan dengan peta gradien geotermal (Darman, 2021); struktur geologi regional utama (Raharjo et al., 2016; Sukamto et al., 2011); serta batas Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) (Flanders Marine Institute, 2025). Lingkaran berwarna putih menunjukkan lokasi prospektif untuk eksplorasi lebih lanjut. Gunung api daratan tidak ditampilkan untuk menjaga kejelasan visual. Informasi referensi lengkap dapat dilihat pada bagian akhir bab ini.

2. **Busur Sangihe**, di Sulawesi Utara juga menunjukkan gradien geotermal tinggi (50°C–75°C per kilometer), dengan kedalaman dasar laut mencapai 4,5 kilometer. Gunung api bawah laut dan lokasi hidrotermal di kawasan ini meliputi Banua Wuhu (0 hingga 2,5 kilometer di bawah permukaan laut), Naung (0,5 hingga 1,5 kilometer), Kawio Barat (1,5 hingga 4,5 kilometer), serta hotspot purba Maselihe (1,5 hingga 4,5 kilometer) yang dipetakan oleh McConachy et al.[18]).

3. **Busur Banda**, busur vulkanik berbentuk tapal kuda, memiliki sejumlah gunung api aktif seperti Banda Api, Wetar, Manuk, Damar, Emperor of China, Nieuwerkerk, dan Romang, dengan tiga nama terakhir berlokasi di laut. Kedalaman Laut Banda berkisar dari 0,5 hingga 5,5 kilometer, dan gradien geotermalnya berada di kisaran 50°C hingga 60°C per kilometer. Aktivitas hidrotermal telah terdokumentasi pada gunung api bawah laut Emperor of China dan Nieuwerkerk.

Selain tiga zona prospektif tersebut, lokasi lain yang berpotensi menjadi sumber daya geotermal bawah laut di Indonesia meliputi Selat Sunda dan Teluk Tomini, lokasi yang juga menunjukkan manifestasi hidrotermal.[19]

Penelitian geologi, geofisika, dan geokimia lebih lanjut sangat penting untuk memodelkan sistem-sistem ini. Pengembangan sumber daya di wilayah *offshore* mengurangi gangguan terhadap lahan dan menghindari konflik pemanfaatan ruang; namun, kelayakan ekstraksi geotermal membutuhkan kajian menyeluruh terhadap bahaya vulkanik bawah laut serta dampak lingkungannya. Studi-studi internasional tentang geotermal bawah laut—antara lain di Meksiko,[20,21] Papua Nugini,[22] Selandia Baru,[23, 24] Jepang[25], and

California[26]— memberikan wawasan eksplorasi yang berharga bagi Indonesia. Dengan memanfaatkan teknologi geotermal onshore dan teknologi produksi hidrokarbon *offshore* yang sudah maju, sumber daya geotermal bawah laut dapat menjadi solusi energi yang hemat biaya dan dapat ditingkatkan skalanya untuk berbagai penggunaan.

Sumber Daya Geotermal Superkritis Sub-Vulkanik (Daratan dan Bawah Laut)

Sumber daya geotermal superkritis berada dalam sistem geotermal yang mengandung fluida pada kondisi di atas ambang kritis (>374°C dan >22 megapaskal), kondisi ketika fase cair dan gas tidak lagi terpisah. Sistem seperti ini mampu menghasilkan energi yang jauh lebih besar dibandingkan sistem hidrotermal konvensional. Sumber daya superkritis diperkirakan berada pada bagian akar dari sistem hidrotermal berasosiasi gunung api, pada kedalaman mendekati atau berada di bawah zona transisi getas–plastis (brittle–ductile transition/ BDT), yaitu zona tempat perilaku batuan berubah dari retakan getas menjadi deformasi plastis seiring peningkatan temperatur dan tekanan.[27]

Eksplorasi sumber daya geotermal superkritis di berbagai negara telah menunjukkan hasil yang signifikan. Di Kakkonda, Jepang, para peneliti telah mengembangkan teknologi untuk memperkirakan temperatur[28] subpermukaan setelah pengeboran mencapai zona BDT.[29] Pengeboran eksplorasi di Krafla dan Reykjanes, Islandia, berhasil mengeluarkan fluida superkritis dan mengidentifikasi zona transisi antara sistem hidrotermal dan magma.[30] Penelitian di Larderello, Italia—lokasi kelahiran pembangkit listrik geotermal—telah menemukan fluida superkritis menggunakan metode seismik dan mendorong kemajuan teknologi pengeboran.[31]

Namun, pengeboran menuju kondisi superkritis menghadirkan tantangan besar, terutama terkait pengelolaan fluida pada temperatur dan tekanan yang sangat tinggi. Untuk mengatasinya, dibutuhkan kemajuan di berbagai aspek pengembangan geotermal. Prioritas utama mencakup peningkatan metode penilaian sumber daya, studi laboratorium mengenai perilaku fluida dan batuan pada kondisi superkritis, pengembangan teknologi pengeboran tingkat lanjut, serta peningkatan metode pencatatan (*logging*) dan pemantauan. Selain itu, pemodelan numerik yang kuat dan pendirian laboratorium lapangan khusus sangat penting untuk memperdalam pemahaman mengenai sumber daya jenis ini.

Rencana komprehensif terkait eksplorasi dan pengembangan sumber daya geotermal superkritis telah dilakukan di Selandia Baru melalui program Geothermal: The Next Generation di Zona Vulkanik Taupo. Program tersebut mencakup penelitian geosains dan pemodelan rekayasa untuk menyelidiki kondisi subpermukaan yang lebih dalam daripada sistem hidrotermal yang telah diketahui. Program ini juga mencakup inventarisasi sumber daya, penyusunan strategi pengembangan, evaluasi kelayakan ekonomi, pertimbangan regulasi, serta proses keterlibatan dan komunikasi pemangku kepentingan.[32]

Dengan mempelajari pengalaman internasional tersebut, Indonesia berpotensi mengembangkan sumber daya geotermal superkritis yang diperkirakan berada di bawah sistem hidrotermal bertemperatur tinggi sepanjang jalur vulkanik (**Gambar 3.5**).

Selain itu, sejumlah kaldera besar di Indonesia—seperti Tondano (Sulawesi Utara), Toba (Sumatra Utara), Batur (Bali), dan Rinjani (Nusa Tenggara Barat)—diperkirakan menyimpan sumber daya geotermal superkritis pada kedalaman tertentu. Tondano dan Toba menghasilkan endapan riolit dalam jumlah besar yang sebanding dengan yang ditemukan di Zona Vulkanik Taupo, mengindikasikan potensi geotermal yang signifikan.

Kaldera Tondano merupakan salah satu kaldera aktif terbesar dalam sejarah geologi Indonesia,[33] dan menjadi lokasi dua sistem geotermal produktif: Lahendong dan Tompaso (**Gambar 3.7**). Kedua lapangan tersebut memiliki sumur-sumur produksi dengan temperatur rata-rata sekitar 250°C.[34] Lahendong termasuk dalam sistem geotermal berinti uap magmatik dan menunjukkan temperatur stabil antara 350°C hingga mendekati 400°C pada kedalaman 2 hingga 2,5 kilometer di beberapa sumur.[35] Sumber panas yang sangat tinggi pada kedalaman relatif dangkal ini menegaskan besarnya potensi energi geotermal di wilayah tersebut.

Sementara itu, Kaldera Toba di Sumatra Utara merupakan



DEPRESI KALDERA TONDANO



Gambar 3.7: Cekungan Kaldera Tondano, yang kini sebagian terisi oleh danau, dilihat dari Bukit Kasuratan, Minahasa, Sulawesi Utara. Sumber: penulis.

sistem vulkanik silisik berskala besar yang terbentuk melalui beberapa super-erupsi sepanjang 1,3 juta tahun terakhir.[36] Studi geofisika menggunakan metode *receiver function* menunjukkan adanya kerak yang menebal (kedalaman batas mantel sekitar 31 kilometer) serta zona berkecepatan rendah pada kedalaman 8 hingga 25 kilometer di bawah Danau Toba, yang mengindikasikan keberadaan zona lelehan parsial atau tubuh magma besar di kerak.[37] Keterkaitan dengan robekan lempeng (*slab tear*) pada bagian barat Busur Sunda mendukung keberadaan fluks panas tinggi yang bersifat persisten serta suplai magmatik dalam.[38] Karakteristik tersebut menunjukkan kemungkinan hadirnya kondisi superkritis pada kedalaman di bawah kaldera.

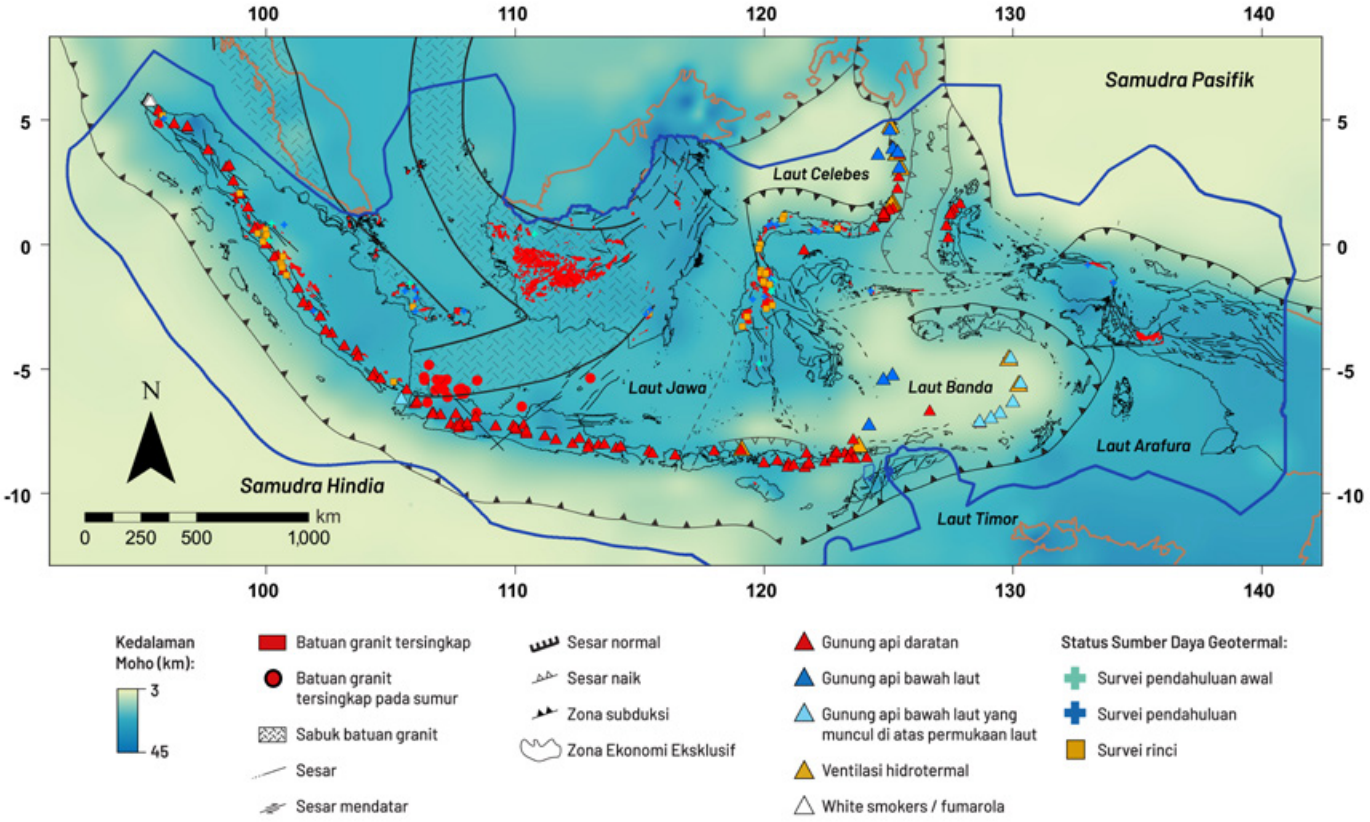
Ke depan, kajian dan eksplorasi terhadap sistem geotermal superkritis di daratan perlu diprioritaskan untuk membangun dasar pengetahuan dan kapasitas teknis. Seiring meningkatnya pemahaman terhadap sistem bertemperatur sangat tinggi tersebut, Indonesia berpotensi memperluas upaya eksplorasi hingga mencakup sumber daya geotermal superkritis bawah laut, sehingga dapat memanfaatkan potensi besar yang tersimpan dalam lingkungan vulkanik lepas pantai.

Sumber Daya Geotermal Radiogenik Berasosiasi Batuan Granit: Hidrotermal dan *Hot Dry Rock* (HDR) (Daratan dan Bawah Laut)

Batuan granit yang kaya uranium, torium, dan kalium menghasilkan panas melalui peluruhan radiogenik,[39,40] sehingga menyediakan sumber panas kerak bumi yang bertahan lama dan berbeda dari pulsa magmatik yang bersifat sementara pada sistem vulkanik. Litologi lain seperti batuan vulkanik felsik atau satuan sedimen dapat pula mengandung panas radiogenik,[41] tetapi heterogenitasnya menyulitkan eksplorasi. Granit dengan tingkat panas radiogenik tinggi tetap menjadi litologi paling prospektif dan paling mudah dijajaki untuk pengembangan geotermal, mulai dari sistem hidrotermal yang mengalir secara alami hingga sistem *hot dry rock* (HDR) yang direkayasa.

Dalam sistem yang diinangi batuan granit, panas geotermal dapat diakses melalui sirkulasi alami air tanah pada granit yang retak, atau melalui stimulasi buatan dengan teknologi *enhanced* atau *engineered geothermal system* (EGS).[42] Sistem hidrotermal bergantung pada permeabilitas alami yang memungkinkan fluida bersirkulasi, menerima panas,

FITUR GEOLOGI YANG RELEVAN TERHADAP POTENSI GEOTERMAL RADIOGENIK DI INDONESIA



Gambar 3.8: Peta kompilasi kedalaman Moho(i.e., depth to mantle; Mooney et al., 2024); granitic rock distributions (Hamilton, 1979; Ng et al., 2017; Sukamto, 2010); geologic structures (Sukamto et al., 2011; Raharjo et al., 2016); on-land volcanoes (Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, 2021); submarine volcanoes (Abbott & Rubenstone, 2024; Aryanto et al., 2023; Kurnio et al., 2015; Špičák et al., 2013); lokasi sumber daya geotermal berasosiasi granit yang telah diketahui maupun yang masih kurang tereksplorasi (Indonesian Geological Agency, 2023); serta batas ZEE (Flanders Marine Institute, n.d.) sebagai panduan untuk mengeksplorasi sumber daya geotermal radiogenik. Informasi referensi lengkap dapat dilihat pada bagian akhir bab ini.

dan bergerak ke arah permukaan. Sebaliknya, sistem HDR menargetkan granit yang kering dan impermeabel sehingga memerlukan rekahan buatan agar jalur aliran fluida terbentuk.

Indonesia memiliki wilayah granit yang menjanjikan dan relatif kurang tereksplorasi, seperti provinsi granit timah Bangka–Belitung, pluton berumur Kapur hingga Jura di Kalimantan Barat, serta sabuk granit di Papua bagian barat dan Sulawesi Tengah (**Gambar 3.8**). Indikasi permukaan seperti mata air hangat dan temperatur air tanah yang meningkat menunjukkan keberadaan aktivitas hidrotermal dangkal.

Kemunculan manifestasi permukaan bergantung pada permeabilitas yang terutama dikontrol oleh rekahan pada tubuh granit, seperti terlihat pada singkapan granit di Pantai Batu Ketak di Pulau Bangka (**Gambar 3.9**). Rekahan tersebut sering kali hanya berkembang pada bagian dangkal, sehingga sebagian besar panas tertahan di bawah sistem hidrotermal. Kondisi ini menunjukkan adanya potensi sumber daya HDR yang berada di bawah sistem hidrotermal radiogenik dalam tubuh granit tersebut. Selain itu, tubuh granit yang terangkat secara tektonik atau tersingkap secara dangkal—yang umumnya memiliki gradien geotermal tinggi pada kedalaman relatif dangkal—dapat menjadi lokasi HDR yang prospektif meskipun tidak menunjukkan manifestasi permukaan.

Sistem granit bawah laut juga berpotensi menjadi frontier eksplorasi baru. Singkapan pluton yang

tenggelam di sepanjang Paparan Sunda dan wilayah timur Indonesia (**Gambar 3.8**) dapat mendukung aktivitas geotermal, terutama pada bagian subpermukaan yang terdeformasi secara struktural dan jenuh fluida. Singkapan granit bawah laut ini mencerminkan sistem di daratan dan berpotensi mengandung sumber daya geotermal konvektif maupun sistem EGS.

Secara global, beberapa proyek menunjukkan kelayakan sistem geotermal berbasis granit. Di Lapangan Huangshadong, Tiongkok, granit kaya uranium dan torium menghasilkan mata air panas serta sumur yang mencapai temperatur lebih dari 120°C pada kedalaman 3 kilometer.[43] Proyek Soultz-sous-Forêts di Prancis dan Cekungan Cooper di Australia merupakan contoh keberhasilan HDR, termasuk keberhasilan stimulasi hidraulik untuk mengekstraksi panas dari granit dalam.[44,45,46] Contoh-contoh tersebut memperlihatkan kelayakan sistem alami maupun sistem rekayasa, terutama pada wilayah dengan kondisi tektonik stabil.

Potensi geotermal Indonesia yang berasosiasi batuan granit masih sangat besar dan sebagian besar belum dimanfaatkan, meskipun banyak intrusi granitoid tinggi uranium dan torium tersebar luas. Kajian geotermal secara sistematis mulai mengalami peningkatan. Survei radiometrik dan aliran panas—yang merupakan praktik standar dalam eksplorasi internasional—kian diakui sebagai metode penting untuk wilayah non-vulkanik di Indonesia.[47] Teknologi geosains kelautan seperti spektrometri gamma bawah laut, marine heat flow probes, dan platform pengeboran dasar laut membuka peluang eksplorasi sistem granit bawah laut. Studi yang melaporkan kadar uranium dan torium tinggi pada granit timah, khususnya di Indonesia bagian barat, semakin menegaskan pentingnya aspek radiogenik dan perlunya penelitian lebih lanjut. Untuk memajukan eksplorasi, pendekatan terpadu yang menggabungkan pemetaan struktur, survei radiometrik dan geokimia, serta pengukuran aliran panas dangkal—banyak di antaranya diadaptasi dari eksplorasi mineral—dapat menjadi metode awal yang efektif. Remote sensing, geofisika kelautan, dan pengeboran laut dalam berperan penting dalam memverifikasi sumber daya bawah laut.

Secara keseluruhan, sistem geotermal berasosiasi batuan granit di Indonesia—baik hidrotermal maupun HDR—merupakan sumber daya yang prospektif dan semakin mendapat perhatian. Investasi strategis dalam eksplorasi, penilaian sumber daya, dan teknologi pendukung dapat mempercepat pengembangan sistem ini serta mendukung diversifikasi sektor geotermal Indonesia di luar wilayah vulkaniknya.

BATU KETAK PANTAI, BANGKA PULAU

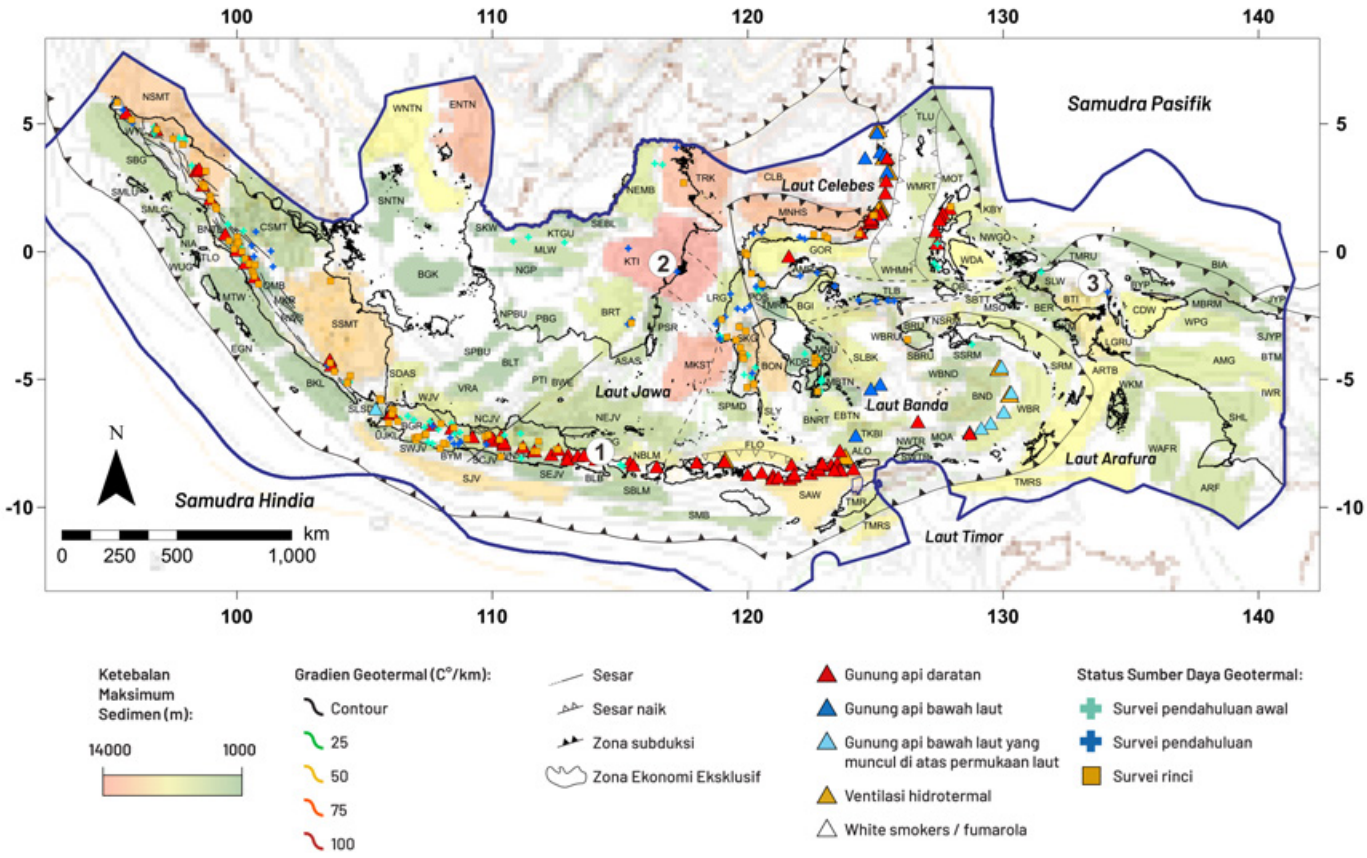


Gambar 3.9: Singkapan batuan granit dengan rekahan rapat di Pantai Batu Ketak, Pulau Bangka. Sumber: penulis.

Sumber Daya Geotermal Berasosiasi Batuan Sedimen (Daratan dan Bawah Laut)

Evolusi tektonik Indonesia yang kompleks telah menghasilkan sejumlah besar cekungan sedimen di seluruh wilayah negara ini. Sebagian cekungan relatif tipis, sementara yang lain memiliki ketebalan yang sangat besar (**Gambar 3.10**). Pengukuran temperatur dari sumur-sumur di berbagai cekungan tersebut sering menunjukkan gradien geotermal yang meningkat, menandakan adanya potensi geotermal yang signifikan (**Gambar 3.11**). Sumber daya geotermal yang berasosiasi batuan sedimen (*sedimentary rock-hosted geothermal resources* / SHGR) menyimpan energi panas terutama dalam batuan sedimen yang berpori, permeabel, dan jenuh fluida, seperti batupasir. Meskipun porositas dan permeabilitas cenderung berkurang seiring kedalaman akibat proses pemadatan, batupasir dapat mempertahankan porositas hingga 15% pada kedalaman 3 kilometer,[48] ilai yang masih memadai untuk sirkulasi fluida dan berada dalam rentang kedalaman yang layak untuk dikembangkan.



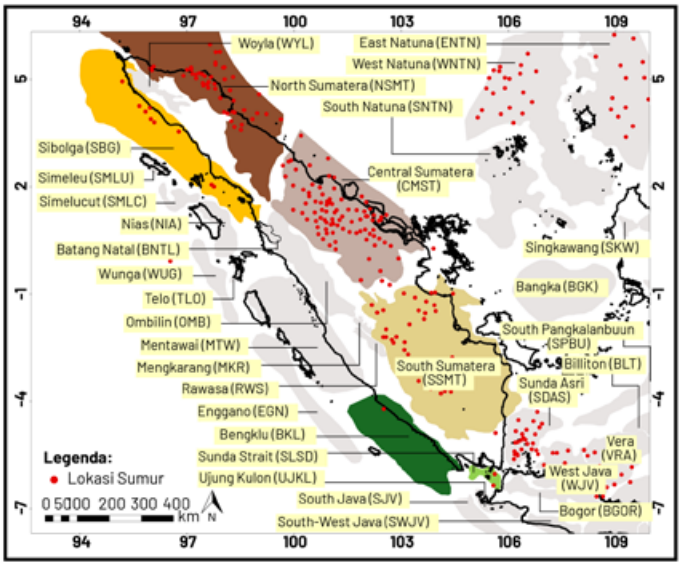


Gambar 3.10: Peta kompilasi cekungan sedimen (Darman, 2019; MEMR, 2022); gradien geotermal (Darman, 2021); struktur geologi regional (Raharjo et al., 2016; Sukamto et al., 2011); sebaran gunung api daratan (Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation of Indonesia, 2021) dan gunung api bawah laut (Abbott & Rubenstone, 2024; Aryanto et al., 2023; Kurnio et al., 2015; Špičák et al., 2013); lokasi sumber daya geotermal berasosiasi batuan sedimen yang telah diketahui maupun yang masih kurang tereksplorasi (Indonesian Geological Agency, 2023); serta batas ZEE (Flanders Marine Institute, n.d.). Angka dalam lingkaran menunjukkan manifestasi permukaan yang dibahas dalam teks: 1. Lusi, 2. Dondang, dan 3. Ransiki–Momi Waren. Informasi referensi lengkap disajikan pada bagian akhir bab ini.

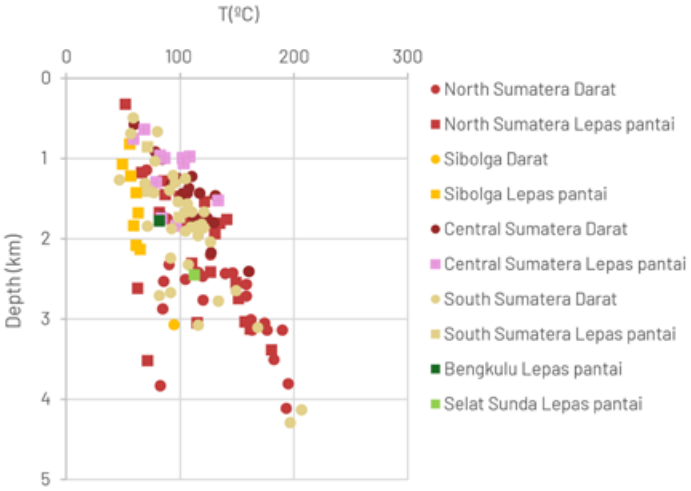
SHGR yang dipengaruhi aktivitas magmatik ditandai oleh temperatur yang tinggi akibat kedekatan dengan sumber panas magmatik. Pengaruh ini sering terdeteksi melalui komposisi gas, khususnya kadar karbon dioksida anorganik yang meningkat (hasil degassing magma) serta metana (berasal dari aktivitas mikroba atau pematangan termal bahan organik dalam batuan sedimen).[49] Wilayah dengan sekuen sedimen tebal yang berdekatan dengan zona vulkanik aktif, seperti di beberapa bagian Italia tengah, telah diidentifikasi sebagai lokasi prospektif untuk SHGR yang dipengaruhi aktivitas magmatik.[50]

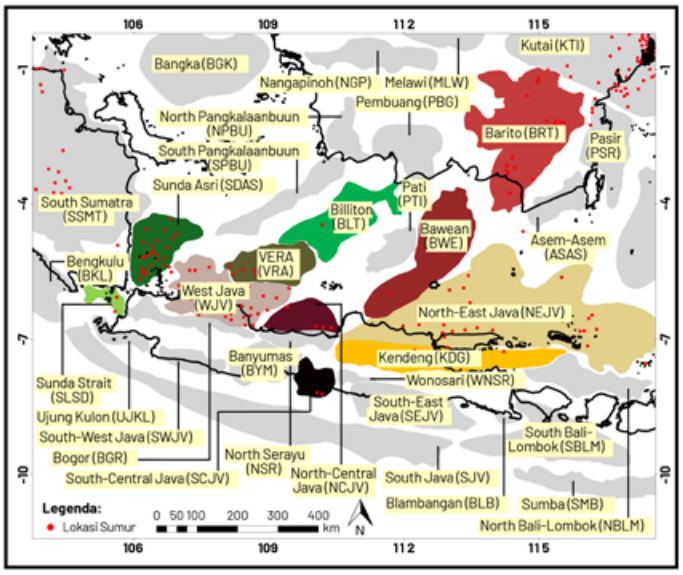
Di wilayah Paparan Sunda, khususnya di Sumatra dan Jawa, banyak sistem perminyakan utama berada dekat dengan busur magmatik aktif. Manifestasi permukaan telah diamati di beberapa lokasi, meskipun belum ada SHGR yang secara formal diklasifikasikan sebagai dipengaruhi aktivitas magmatik. Erupsi lumpur Lusi di Jawa Timur merupakan contoh interaksi mendalam antara proses magmatik dan sedimen. Pembentukan hidrokarbon di kawasan tersebut juga berkaitan dengan intrusi dari Kompleks Vulkanik Arjuno–Welirang.[51] Bukti seismik dari Cekungan Kendeng menunjukkan bahwa aktivitas magmatik sedang memengaruhi dan mengubah struktur subpermukaan.[52] Meskipun data komposisi gas akan memberikan identifikasi yang lebih pasti, berbagai indikator tersebut menunjukkan kemungkinan keberadaan SHGR yang dipengaruhi proses magmatik.

GRADIEN GEOTERMAL PADA SUMUR MINYAK

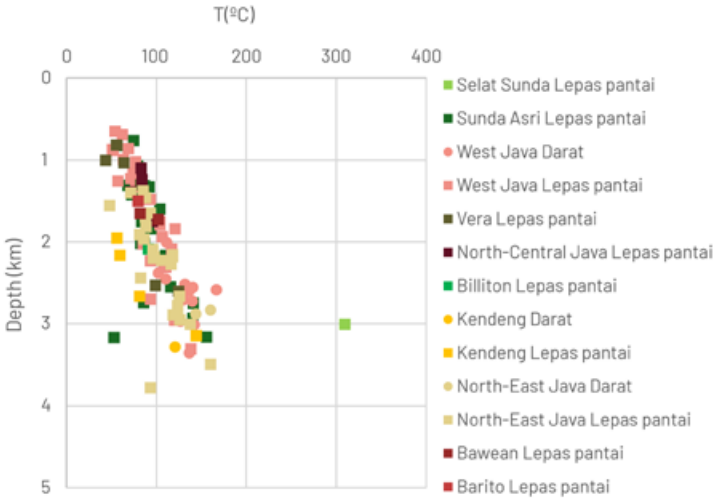


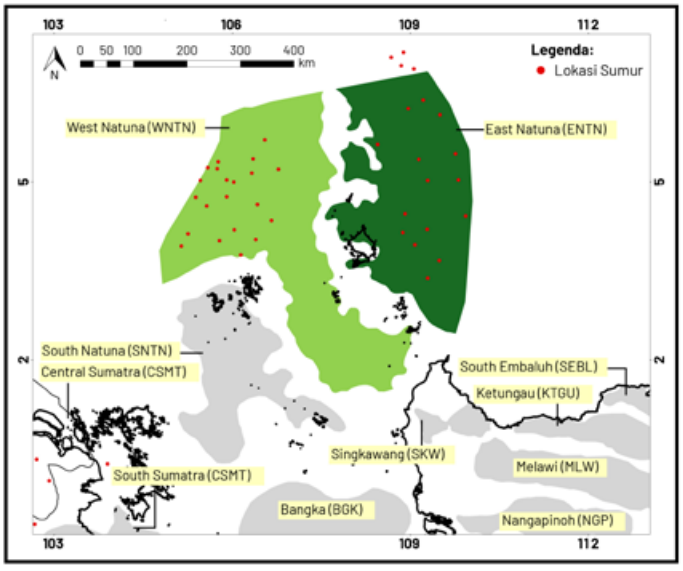
Sumatra Region



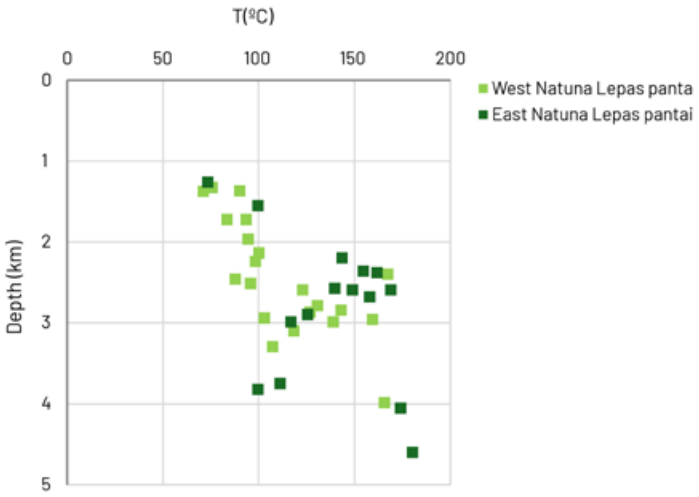


Java Region

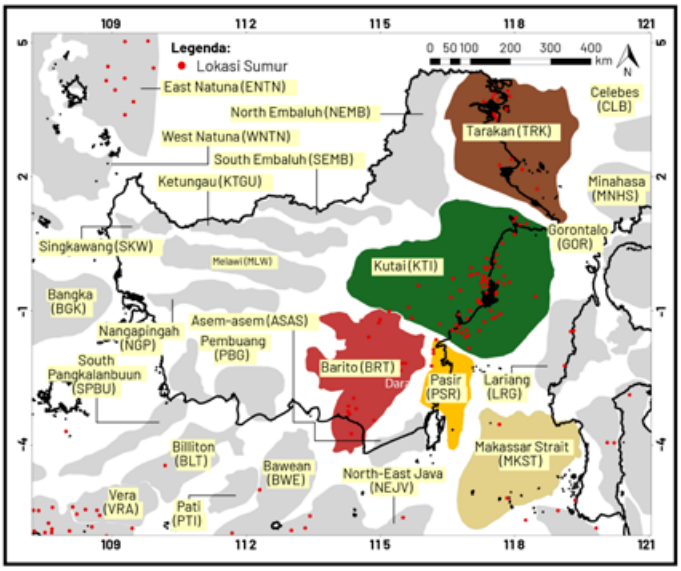




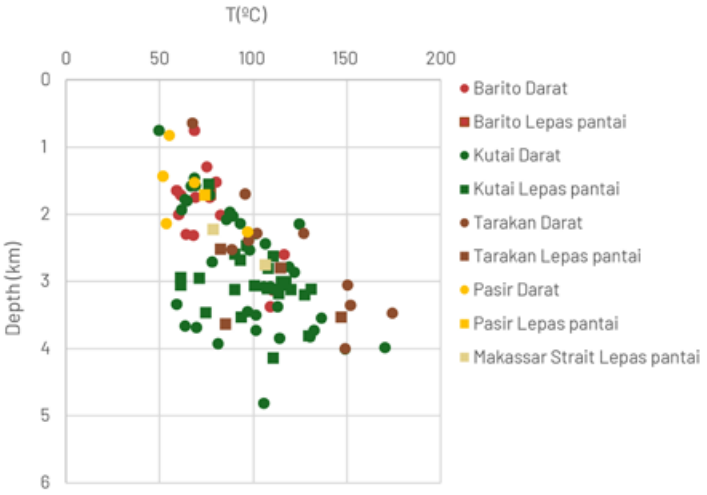
Natuna

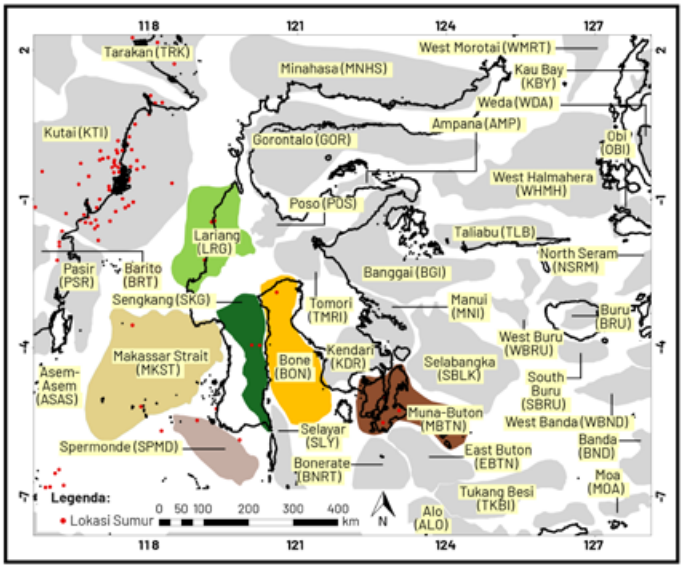


Gambar 3.11: Gradien geotermal pada beberapa sumur minyak darat dan lepas pantai terpilih. Sumber: dikompilasi dari berbagai referensi, termasuk Indonesian Petroleum Association. (1981). Geothermal gradient map of Indonesia (2nd ed.). AAPG Archives Datapages.

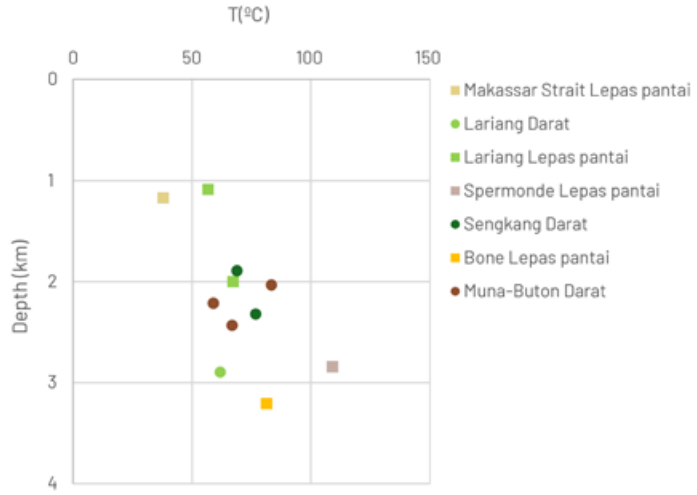


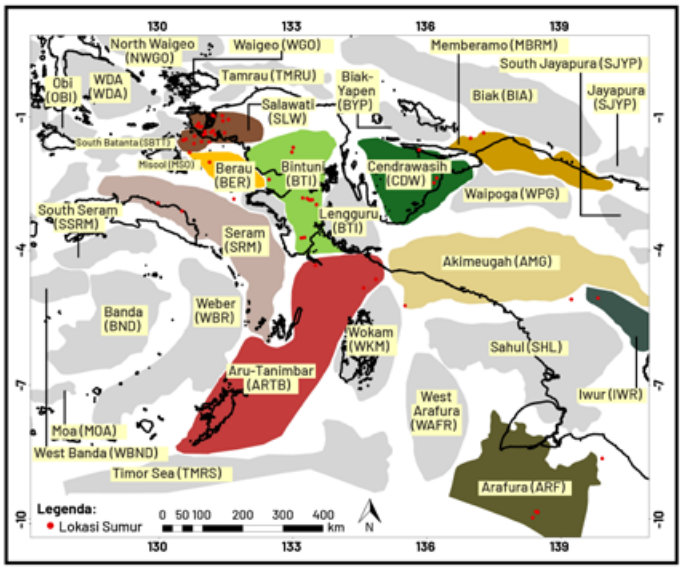
Kalimantan Region



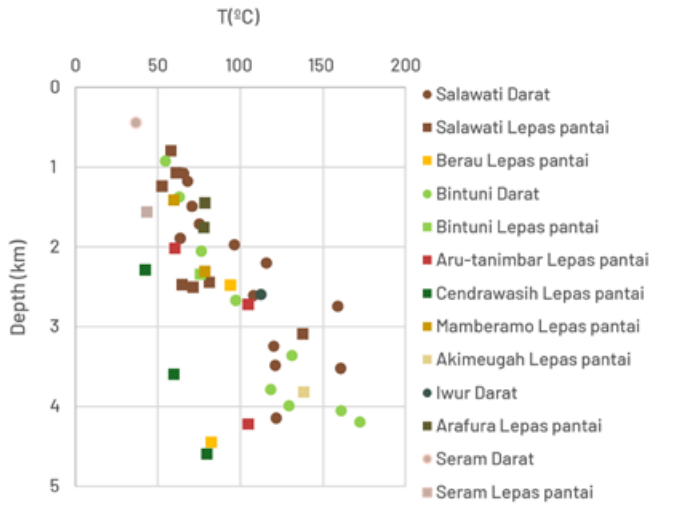


Sulawesi Region





Papua Region and Seram Island



Gambar 3.11 dilanjutkan.

Di Sumatra, bukti langsung masih terbatas, tetapi gradien geotermal yang meningkat serta data temperatur sumur menunjukkan adanya potensi sumber daya (**Gambar 3.10** dan **3.11**). Sebagai contoh, meskipun Cekungan Sibolga menunjukkan gradien geotermal normal (<30°C per kilometer), cekungan bagian timur seperti Sumatra Utara dan Sumatra Selatan memperlihatkan temperatur yang lebih tinggi, dengan temperatur reservoir mencapai sekitar 200°C. Kondisi ini merupakan indikasi kuat pengaruh magmatik, meskipun dapat bersifat lokal.

Berbeda dengan SHGR yang dipengaruhi proses magmatik, sistem hot *sedimentary aquifer* (HSA) memperoleh panas terutama dari peluruhan radioaktif dalam sedimen atau dari perpindahan panas konduktif yang berasal dari kerak bagian bawah atau mantel atas.[53,54,55] Mekanisme konduktif tersebut berkaitan dengan gradien geotermal regional, yang dipengaruhi oleh ketebalan kerak dan umur geologisnya.[56] Batuan sedimen berbutir halus seperti serpih (*shales*) dan batulempung (*mudrocks*) berperan penting dalam sistem HSA, tidak hanya karena kemampuannya menghasilkan panas radiogenik yang relatif tinggi, tetapi juga karena konduktivitas termal yang rendah sehingga mampu menjebak panas di bawahnya. Contoh sistem seperti ini dapat ditemukan pada Cekungan Teluk Meksiko di Texas serta Cekungan Gippsland dan Otway di Australia.

Cekungan sedimen yang berada jauh dari busur vulkanik modern merupakan kandidat potensial untuk SHGR tipe *hot sedimentary aquifer* (HSA). Sebagai contoh, Cekungan Sumatra Tengah telah dimodelkan sebagai sumber daya HSA, dengan zona tengahnya menunjukkan potensi tertinggi.[57] Di Jawa bagian selatan, manifestasi permukaan ditemukan di berbagai lokasi dalam cekungan tersebut (**Gambar 3.10**), namun cekungan-cekungan ini berada di atas endapan vulkanik berumur tua dan terpisah secara struktural dari busur vulkanik aktif oleh sesar naik[58]. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa panas residual atau peluruhan radiogenik merupakan sumber panas utama, sehingga memperkuat potensi HSA.

Prospek HSA lain yang menjanjikan terdapat di Kalimantan (misalnya Tarakan, Kutai, dan Barito) serta Natuna (Barat dan Timur). Wilayah-wilayah ini tidak mengalami pengaruh vulkanik muda dan menunjukkan akumulasi sedimen yang sangat tebal (>5 kilometer), kondisi yang mendukung perkembangan sistem HSA. Data subpermukaan juga menunjukkan gradien temperatur yang meningkat. Manifestasi permukaan telah dilaporkan di ketiga cekungan Kalimantan tersebut. Lokasi Dondang di Cekungan Kutai, misalnya, berada dekat inti anomali gradien geotermal yang nyata dan bertepatan dengan bagian terdalam cekungan (**Gambar 3.10**).

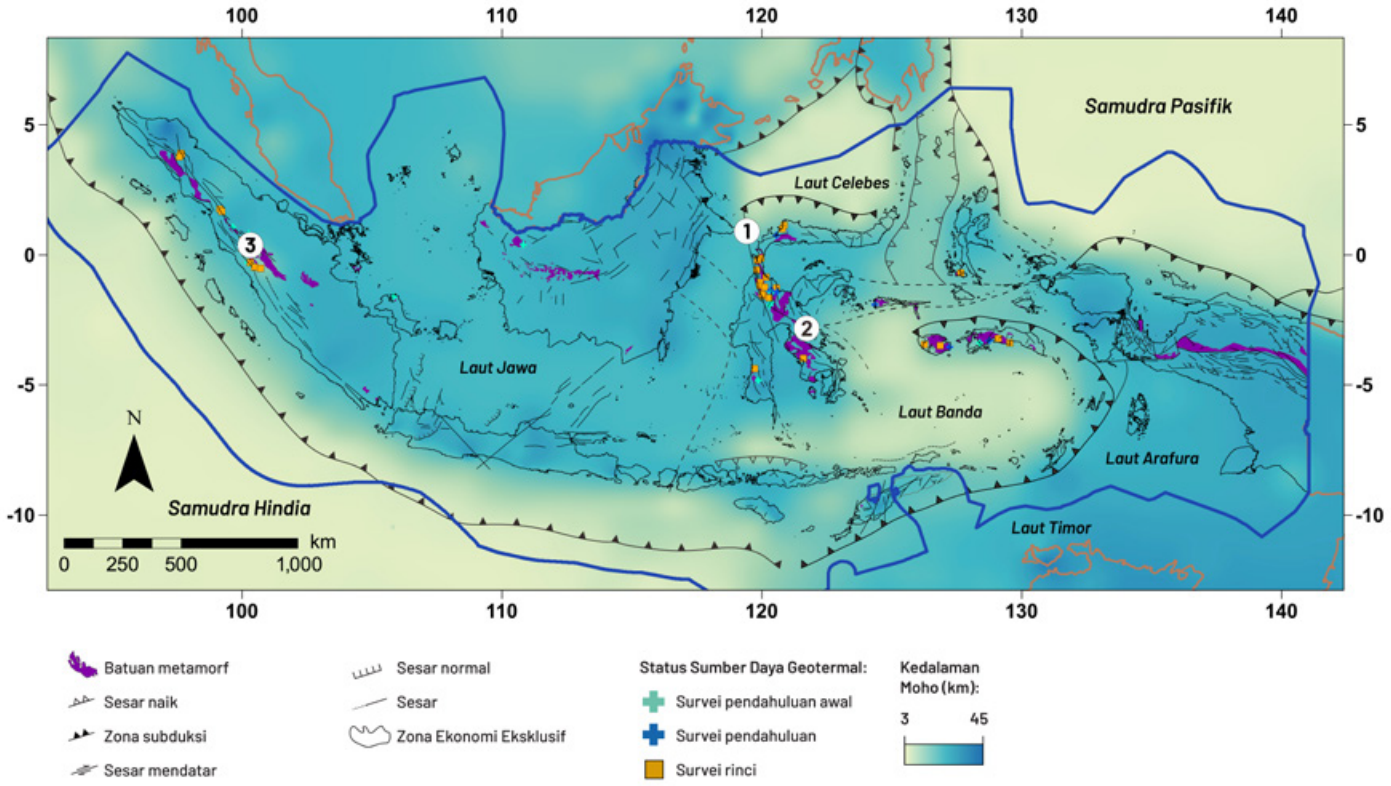
Di Sulawesi, berbagai manifestasi geotermal telah diidentifikasi, khususnya di bagian selatan dan tenggara. Namun, data temperatur reservoir yang tersedia menunjukkan bahwa gradien geotermal berada pada kisaran normal (**Gambar 3.11**). Dengan mempertimbangkan keberadaan manifestasi, ketebalan cekungan, serta tidak adanya aktivitas magmatik, wilayah tersebut secara teoritis merupakan kandidat HSA, meskipun konfirmasi lebih lanjut tetap diperlukan.

Di Papua, cekungan sedimen umumnya tipis dan gradien geotermalnya sebagian besar normal, kecuali di wilayah Kepala Burung. Manifestasi permukaan jarang ditemukan baik di dalam maupun di luar cekungan sedimen, dengan pengecualian pada sistem Ransiki–Momi Waren di Cekungan Bintuni (**Gambar 3.10**). Meskipun demikian, Cekungan Bintuni dan Salawati menunjukkan temperatur subpermukaan yang melebihi 150°C pada kedalaman 3 hingga 4 kilometer (**Gambar 3.11**). Kombinasi gradien geotermal yang tinggi dan manifestasi permukaan yang terbatas mengindikasikan potensi HSA pada wilayah dengan permeabilitas yang mungkin terbatas pada bagian dekat permukaan.

Cekungan lepas pantai seperti di Sumatra Timur, Kepulauan Riau, Laut Jawa Utara, dan Selat Malaka menunjukkan sedimen yang sangat tebal disertai anomali termal, kondisi yang mendukung pembentukan SHGR. Klasifikasi awal sebagai sistem yang dipengaruhi magmatik atau sebagai HSA dapat dilakukan berdasarkan temperatur reservoir serta jaraknya terhadap pusat vulkanik. Misalnya, Cekungan Selat Sunda menunjukkan temperatur yang sangat tinggi (**Gambar 3.11**), kemungkinan terkait pengaruh magmatik dari Krakatau, sehingga mengarah pada klasifikasi SHGR yang dipengaruhi magmatik.



FITUR GEOLOGI YANG RELEVAN TERHADAP POTENSI GEOTERMAL BERASOSIASI BATUAN METAMORF DI INDONESIA



Gambar 3.12: Peta kompilasi yang menggambarkan sebaran batuan metamorf (Setiawan et al., 2012; Sukamto, 2010); struktur geologi (Raharjo et al., 2016; Sukamto et al., 2011); lokasi sumber daya geotermal berasosiasi batuan metamorf yang telah diketahui maupun yang masih kurang tereksplorasi (Indonesian Geological Agency, 2023); kedalaman Moho (Mooney et al., 2024); serta batas ZEE (Flanders Marine Institute, n.d.). Angka dalam lingkaran menunjukkan sesar yang disebutkan dalam teks: 1. Sesar Palu-Koro dan 2. Sesar Matano. Informasi referensi lengkap disajikan pada bagian akhir bab ini.

Pengembangan SHGR dapat memperoleh manfaat dari pendekatan yang disesuaikan dengan karakteristik termal dan geologisnya, yang berbeda dengan sistem bertemperatur tinggi berasosiasi gunungapi. Mengingat temperatur SHGR umumnya lebih rendah, pembangkit listrik siklus biner merupakan pilihan teknologi konversi yang sesuai. Pada wilayah yang memiliki aktivitas produksi minyak dan gas, sistem pembangkit geotermal *co-produced* dapat dipertimbangkan untuk memanfaatkan panas residual dari brine atau air yang dihasilkan selama operasi hidrokarbon.[59] Selain itu, sumur minyak dan gas yang telah ditinggalkan memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sistem geotermal closed-loop, memungkinkan ekstraksi panas tanpa perlu mensirkulasikan fluida melalui reservoir.[60,61]

Sumber Daya Geotermal Berasosiasi Batuan Metamorf (Daratan)

Meskipun belum memiliki standar klasifikasi universal seperti sistem vulkanik atau sistem batuan sedimen, istilah sumber daya geotermal berasosiasi batuan metamorf (*metamorphic-hosted geothermal resource* / MHGR) digunakan untuk menggambarkan sistem geotermal yang batuan inangnya didominasi sekis, gneiss, atau batuan lain yang terbentuk melalui metamorfisme protolit sedimen atau batuan beku. Karena sifat kristalin batuan metamorf, permeabilitas matriksnya umumnya rendah sehingga aliran fluida sangat bergantung pada rekahan dan sistem sesar. Akibatnya, permeabilitas pada MHGR sering bersifat kompleks, heterogen secara spasial, dan dapat berubah terhadap waktu.[62]

Bagian timur Indonesia—termasuk Sulawesi, Sula, Buru, dan Seram—memiliki paparan batuan metamorf yang luas serta struktur geologi yang sangat kompleks (**Gambar 3.11**). Satuan batuan metamorf di Sulawesi berkaitan erat dengan zona sesar utama, khususnya di bagian tengah pulau.[63,64] Antarmuka antara sesar dan batuan metamorf tersebut menciptakan kondisi yang baik bagi perkembangan MHGR dengan meningkatkan permeabilitas, memfasilitasi transportasi panas dari kedalaman, serta memungkinkan sirkulasi fluida. Potensi ini diperkuat oleh banyaknya manifestasi permukaan, terutama di sekitar Sesar Palu-Koro dan Sesar Matano (**Gambar 3.11**), termasuk di daerah Bora dan Pulu.[65] Kehadiran pluton granit berukuran besar di wilayah ini menunjukkan bahwa sumber panas utama MHGR kemungkinan berasal dari pemanasan akibat geseran sepanjang sesar atau panas radiogenik dari batuan granit.

Sulawesi bagian selatan juga memiliki potensi untuk sistem geotermal berasosiasi batuan metamorf (MHGS), meskipun potensinya kemungkinan lebih kecil dibandingkan wilayah tengah. Bukti aktivitas hidrotermal dalam batuan metamorf telah dilaporkan di daerah Mangolo, tempat mata air panas dan gas muncul melalui rekahan pada batugamping metamorf.[66] Potensi serupa juga ditemukan di Pulau Buru, seperti di daerah Wapsalit[67] dan di Pulau Seram. Di wilayah tersebut, sumber panas lebih mungkin berasal dari pemanasan akibat geseran, penebalan kerak yang berkaitan dengan tektonik aktif dekat zona subduksi, atau aktivitas magmatik yang berasosiasi dengan proses subduksi.

Di Sumatra, batuan metamorf muncul sepanjang Zona Tektonik Medial Sumatra, dengan singkapan di permukaan terutama terdapat pada bagian utara dan tengah (**Gambar 3.12**). Ke arah tenggara, keberlanjutan satuan metamorf tertutup oleh endapan vulkanik dan sedimen yang tebal, tetapi bukti geologis menunjukkan keberadaannya di subpermukaan.[68,69] Manifestasi geotermal yang berada dekat satuan metamorf tersebut menunjukkan adanya sistem yang aktif. Selain itu, karena sabuk metamorf Sumatra beririsan dengan busur vulkanik, sistem geotermal hibrida dapat terbentuk, mengombinasikan sumber panas magmatik dengan reservoir panas metamorf (dan kemungkinan sedimen). Kedekatan dengan Sesar Sumatra juga menunjukkan bahwa batuan metamorf di wilayah tersebut mungkin memiliki permeabilitas yang cukup untuk memungkinkan pengembangan geotermal.

Batuan metamorf di Kalimantan dan Papua juga berpotensi untuk MHGR, meskipun manifestasi permukaannya terbatas. Kedua wilayah tersebut telah mengalami deformasi intensif melalui aktivitas sesar, kondisi yang dapat meningkatkan permeabilitas pada formasi metamorf. Di Jawa, singkapan batuan metamorf bersifat setempat dan terlalu terbatas untuk pemetaan regional. Karena sebarannya yang sangat terbatas, batuan metamorf di Jawa kecil kemungkinannya berperan penting dalam pembentukan sistem geotermal. Mengingat pemetaan saat ini hanya mencakup wilayah daratan, potensi MHGR bawah laut di Indonesia masih sangat minim dieksplorasi.

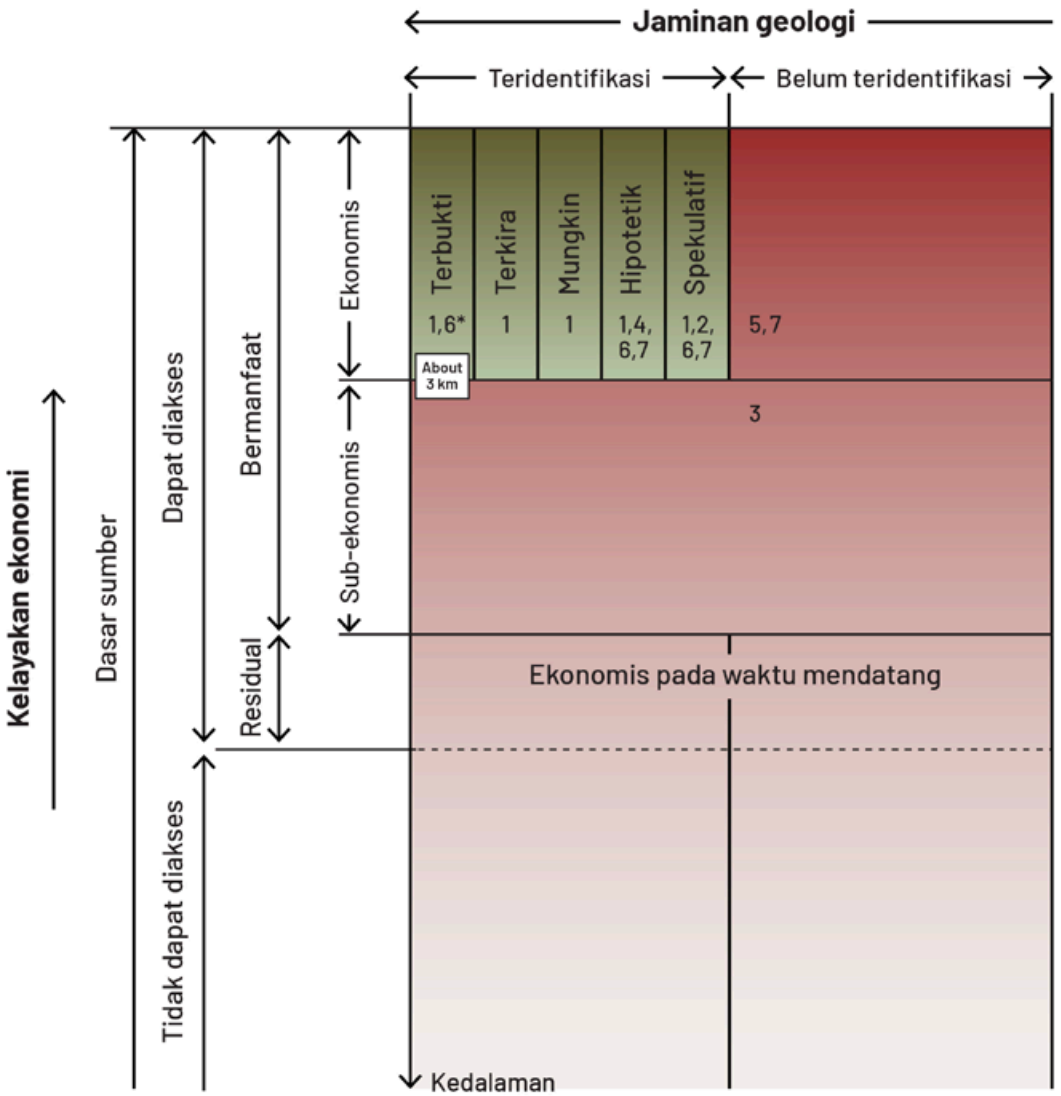
Meskipun intensif mengalami rekahan, batuan metamorf dapat menjadi inang sistem hidrotermal yang sesuai untuk produksi geotermal, sebagaimana dibuktikan di Taiwan.[70,71] Selain itu, konduktivitas termal batuan metamorf yang tinggi menjadikannya reservoir panas yang efektif. Pada wilayah yang rekahannya terbatas, batuan metamorf memiliki potensi kuat sebagai sistem HDR, seperti yang ditunjukkan oleh proyek Northwest Geysers di California, Amerika Serikat.[72]

Namun, pengembangan MHGR sering terkendala oleh keterbatasan pengetahuan mengenai karakteristik sistem subpermukaan. Parameter penting seperti temperatur, permeabilitas, dan kimia fluida sering kali kurang terkuak pada lingkungan geologi tersebut. Selain itu, banyak terane metamorf berasosiasi dengan mineralisasi, seperti endapan emas di Sulawesi Tenggara.[73] Lingkungan yang kaya mineral ini umumnya memiliki kumpulan data yang luas hasil eksplorasi pertambangan, termasuk survei geofisika, analisis inti bor, serta pencatatan temperatur sumur (*downhole temperature logs*). Pemanfaatan dataset tersebut dapat secara signifikan meningkatkan karakterisasi sistem geotermal pada wilayah batuan metamorf.

Sinergi pertambangan–geotermal ini ditunjukkan oleh tambang emas Lihir di Papua Nugini. Meskipun Lihir merupakan sistem berasosiasi gunung api dan bukan MHGR, lokasinya memberikan contoh nyata manfaat teknis dan ekonomi dari integrasi energi geotermal



JAMINAN SUMBER DAYA PANAS BUMI – DIAGRAM McKELVEY



Tipe Sumber Daya Geotermal:

1. Hidrotermal berasosiasi gunung api (daratan)
2. Hidrotermal berasosiasi gunung api (bawah laut)
3. Superkritis sub-vulkanik
4. Radiogenik berasosiasi batuan granit – hidrotermal
5. Radiogenik berasosiasi batuan granit – hot dry rock
6. Berasosiasi batuan sedimen ("terbukti oleh sumur minyak")
7. Berasosiasi batuan metamorf

Sumber Daya
Energi yang dapat diekstraksi secara ekonomis dan legal dalam waktu dekat

Cadangan
Bagian dari sumber daya yang dapat diekstraksi secara ekonomis dan legal pada saat ini

Gambar 3.13: McKelvey yang menunjukkan tingkat keyakinan geologi untuk berbagai jenis sumber daya geotermal. Pengelompokan sumber daya "teridentifikasi" mengikuti SNI 6009:2017. Sumber: Muffler, P., & Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. Geothermics, 7(2-4), 53-89; National Standardization Agency of Indonesia. (2017). SNI 6009:2017 Classification of geothermal energy resources and reserves in Indonesia (in Bahasa Indonesia). Government of Indonesia.

dalam operasi pertambangan. Sejak 2003, produksi geotermal di Lihir telah secara konsisten memasok listrik, menghasilkan 56 megawatt listrik pada 2010 untuk mendukung kegiatan tambang dan infrastruktur terkait.[74]

RINGKASAN

Indonesia merupakan produsen listrik geotermal terbesar kedua di dunia, namun kapasitas 2.653 megawatt yang dihasilkan dari sumber daya konvensional hanya mencerminkan sebagian kecil dari total potensi 23,7 gigawatt yang dimiliki negara ini. Karena pengaturan geologi Indonesia sangat beragam, sumber daya geotermal di seluruh negeri juga bervariasi secara signifikan. Keragaman tersebut menuntut penerapan berbagai teknik eksplorasi dan strategi ekstraksi energi yang disesuaikan, bukan pendekatan tunggal untuk semua tipe. Dalam bab ini, lima jenis sumber daya geotermal diidentifikasi: (1) hidrotermal berasosiasi gunung api, (2) superkritis sub-vulkanik, (3) radiogenik berasosiasi granit (hidrotermal dan hot dry rock), (4) berasosiasi batuan sedimen, dan (5) berasosiasi batuan metamorf.

Dengan mengevaluasi tingkat keyakinan geologi dari kelima jenis sumber daya tersebut menggunakan diagram McKelvey (**Gambar 3.13**), analisis menunjukkan bahwa sumber daya seperti hidrotermal berasosiasi gunung api bawah laut, radiogenik, dan berasosiasi batuan metamorf memerlukan upaya eksplorasi tambahan untuk meningkatkan klasifikasi tingkat keyakinan geologinya. Metode eksplorasi perlu dipilih sesuai karakteristik masing-masing tipe sumber daya. Pengeboran pada akhirnya akan menentukan layak atau tidaknya metode tertentu secara teknis maupun ekonomis. Untuk sistem geotermal bawah laut, studi kondisi lingkungan dasar laut harus dilakukan dengan pendekatan yang mampu memitigasi potensi dampak terhadap ekosistem laut.

Kemajuan riset internasional mengenai geotermal superkritis memberikan dorongan kuat bagi Indonesia—dengan banyaknya gunung api dan gradien geotermal yang tinggi—untuk mulai mengeksplorasi pengembangan sumber daya tersebut secara sistematis. Namun, pekerjaan besar masih diperlukan, terutama dalam penyesuaian teknik identifikasi sumber daya, penetapan strategi mitigasi risiko pengembangan, serta penjaminan kelayakan ekonomi. Sumber daya geotermal superkritis menawarkan bidang pengembangan energi terbarukan baru yang mampu menghasilkan energi dalam jumlah sangat besar, tetapi merupakan sumber daya yang paling sedikit dipahami dan memiliki risiko pengembangan tertinggi karena temperatur, tekanan, dan karakteristik geokimia yang ekstrem. Pengembangannya membutuhkan teknologi pengeboran tingkat lanjut dan perlindungan lingkungan yang ketat. Untuk mengatasi tantangan tersebut, komitmen tinggi dari seluruh pemangku kepentingan menjadi hal yang sangat penting. Di atas segalanya, pemerintah Indonesia dan regulator harus menyediakan kerangka kebijakan yang jelas, rencana pendanaan, perizinan, serta skema bisnis khusus untuk mengurangi ketidakpastian dan menarik investasi.





Bab 3, Bagian 2

Memperluas Cakupan: Peluang Pengembangan Geotermal Generasi

Higinia Torregrosa, Project InnerSpace

Kondisi geologi Indonesia yang sangat khas membuka peluang besar untuk mengembangkan teknologi panas bumi generasi baru. Tidak hanya mengandalkan sumber daya dari sistem hidrotermal konvensional, potensi panas bumi juga tersimpan di cekungan sedimen panas serta formasi batuan dengan gradien panas yang tinggi, wilayah-wilayah yang sebelumnya kurang dilirik karena permeabilitasnya rendah. Jenis sumber daya ini dapat dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan, mulai dari pendinginan bangunan, pemanasan untuk industri, hingga pembangkit listrik. Menggunakan pendekatan yang sama dengan laporan IEA's Future of Geothermal, kajian nasional yang dilakukan Project InnerSpace menunjukkan bahwa potensi panas bumi Indonesia jauh lebih besar dan lebih beragam daripada perkiraan selama ini. Potensi tersebut tidak hanya berasal dari sistem konvensional, tetapi juga dari sumber daya panas bumi yang tersebar luas di bawah permukaan tanah. Hasil analisis memperkirakan bahwa lebih dari 2.000 gigawatt potensi teknis panas bumi dapat diakses dalam kedalaman hingga 5 kilometer (di luar kawasan lindung). Angka ini lebih besar dibanding estimasi potensi panas bumi konvensional Indonesia saat ini.

MENGAPA POTENSI PANAS BUMI GENERASI BERIKUTNYA DI INDONESIA PENTING

Sebagai produsen listrik panas bumi terbesar kedua di dunia, Indonesia telah memiliki seluruh elemen penting untuk memasuki fase baru pengembangan panas bumi. Meskipun busur vulkanik Indonesia selama ini menjadi penopang proyek hidrotermal konvensional, sumber daya tersebut hanyalah sebagian kecil dari total potensi panas bumi nasional. Cadangan sangat besar yang belum dimanfaatkan dalam cekungan sedimen dan formasi konduktif dengan permeabilitas rendah—yang dapat dibuka melalui teknologi yang berkembang di sektor minyak dan gas—dapat memungkinkan penerapan panas bumi generasi berikutnya secara luas untuk kebutuhan panas, pendinginan, dan listrik di seluruh nusantara.

Seperti dibahas di Bab 1, "Panas bumi 101: Gambaran Umum tentang Teknologi dan Aplikasi Panas Bumi Terbaru," sistem panas bumi generasi berikutnya menggunakan teknologi yang dikembangkan di industri minyak dan gas, termasuk pengeboran horizontal, perbaikan teknologi mata bor, dan rekahan hidraulis untuk mengakses panas bawah permukaan di wilayah yang memiliki sangat sedikit atau tidak



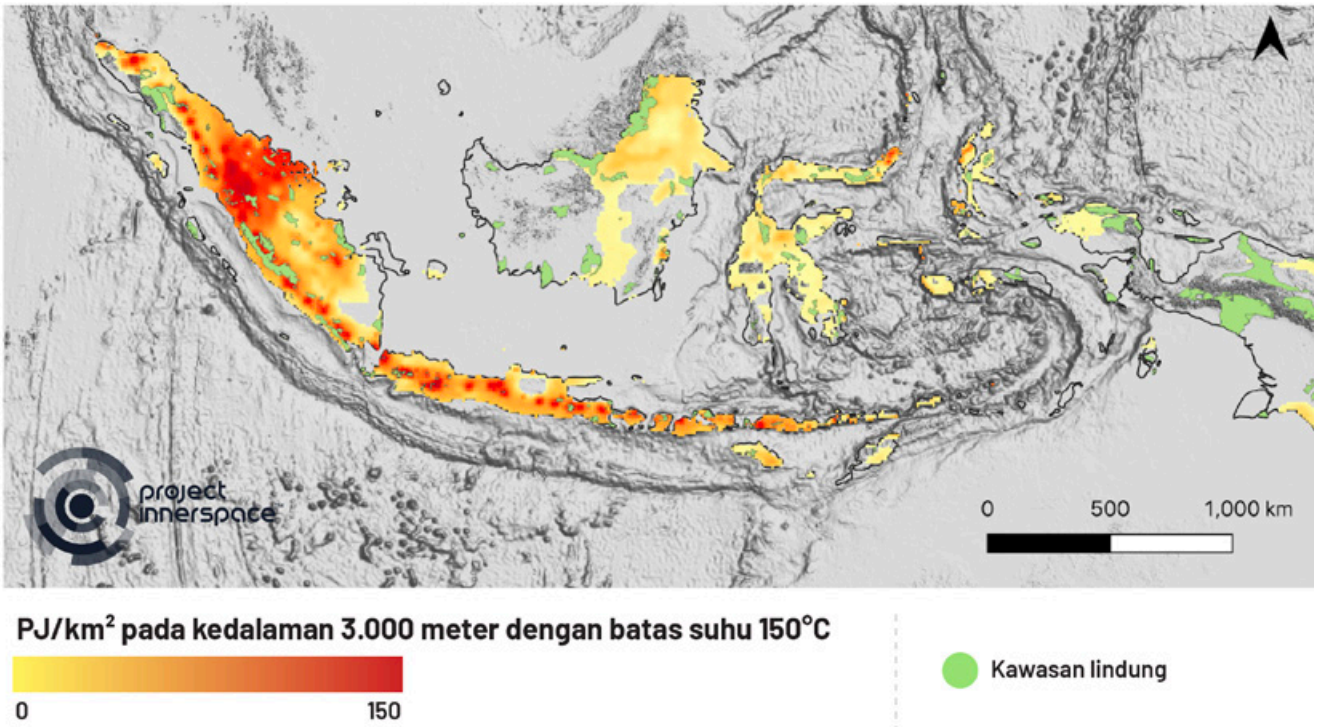
ada sirkulasi fluida alami (berbeda dengan sistem hidrotermal konvensional).

Bab ini memperluas cakupan analisis panas bumi Indonesia melampaui konteks geologi busur vulkanik untuk memasukkan seluruh sumber panas bawah permukaan. Bab ini menguraikan total potensi panas bumi nasional; membedakan peluang konvensional dan generasi berikutnya; serta menjelaskan bagaimana peluang tersebut dapat diterapkan untuk listrik, panas, dan pendinginan. Peta dalam bab ini—dibuat menggunakan GeoMap milik Project InnerSpace[1], menggambarkan potensi sumber daya dan memberikan kerangka untuk mengidentifikasi wilayah yang menjanjikan bagi pengembangan.

Baik untuk pembangkitan listrik, panas industri langsung, maupun sistem pendinginan geothermal, frontier baru panas bumi ini dapat memainkan peran transformasional bagi perekonomian Indonesia.

Seiring meningkatnya kebutuhan energi dan pendinginan, transisi Indonesia menuju sistem pendinginan berkelanjutan menjadi semakin mendesak. Kepemilikan air conditioner (AC) rumah tangga di Indonesia diperkirakan akan melonjak signifikan, dari kurang dari 15% saat ini menjadi 50% pada 2035 dan 85% pada 2050[2]. Lonjakan ini akan mendorong peningkatan tajam permintaan listrik dan emisi. Proyeksi meningkatnya kebutuhan pendinginan tersebut menegaskan perlunya memprioritaskan sistem panas bumi sebagai jalur berkelanjutan untuk

TOTAL PANAS BUMI INDONESIA (HEAT-IN-PLACE), TERMASUK KAWASAN LINDUNG



Gambar 3.14: Total potensi panas bumi Indonesia (heat-in-place) dari GeoMap dengan overlay Kawasan Lindung Indonesia. Peta ini dibuat untuk menyoroti wilayah-wilayah dengan potensi panas bumi tertinggi di Indonesia. Nilai yang ditampilkan merupakan potensi kumulatif hingga kedalaman 3 kilometer, sehingga perbedaan antarwilayah dapat terlihat dengan jelas. Jika analisis diperluas hingga 5 kilometer, hampir seluruh peta akan tampak berwarna merah, sehingga kontras dan informasi penting menjadi hilang. Sumber: Project InnerSpace. (2025). Heat in Place (PJ/km2) up to 3000 m 150°C cutoff Data Set. GeoSpace; UNEP-WCMC and IUCN (2025), Protected Planet: [The World Database on Protected Areas (WDPA)] [On-line], [October/2025], Cambridge, UK: UNEP-WCMC and IUCN. Available at: www.protectedplanet.net

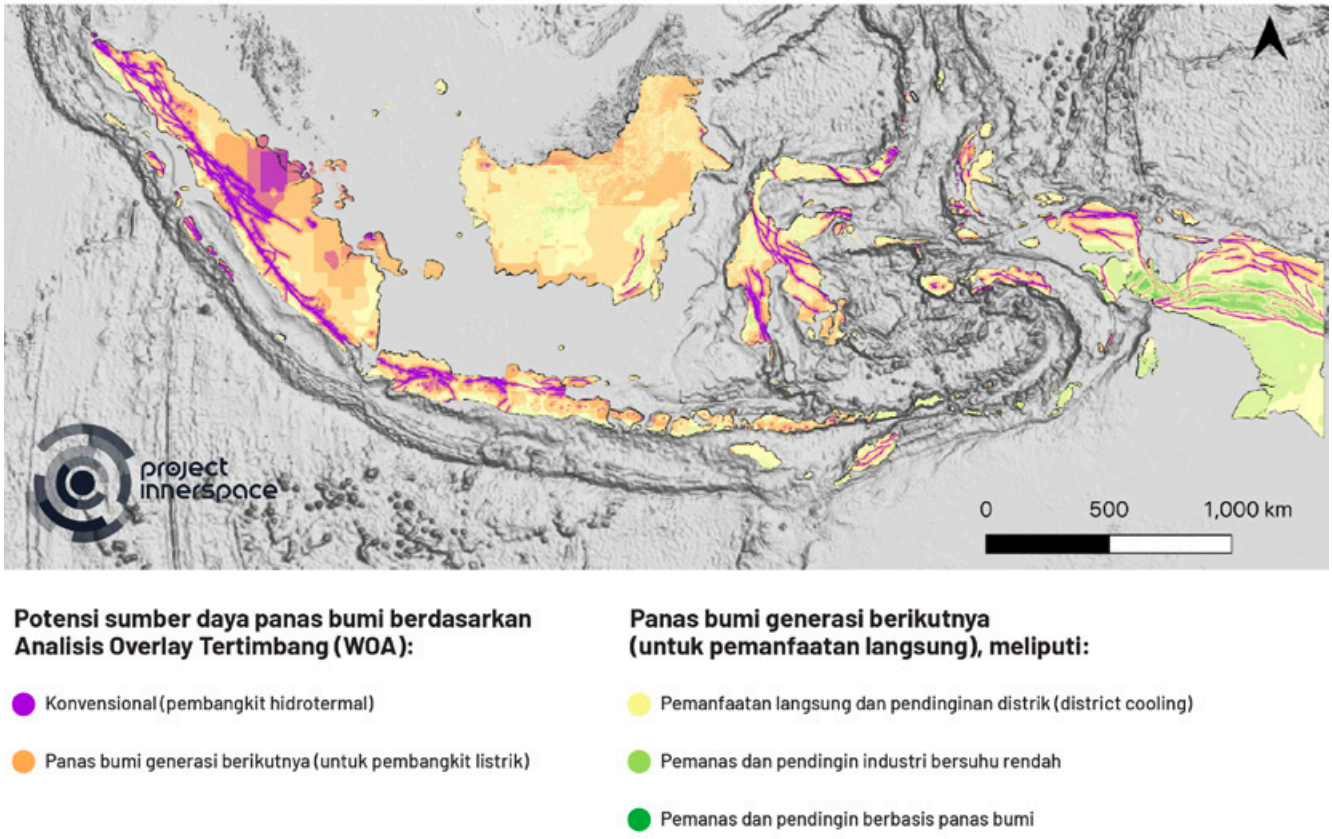
memenuhi kebutuhan energi termal Indonesia yang terus bertambah.

Selain untuk pendinginan, panas bumi juga dapat memainkan peran transformatif di sektor industri Indonesia. Sumber daya bertemperatur sedang menawarkan pasokan panas yang stabil dan rendah karbon bagi industri manufaktur, pengolahan pangan, serta sektor energi intensif lainnya. Pada temperatur yang lebih tinggi, sistem panas bumi rekayasa (*engineered geothermal systems*) yang dikembangkan di formasi bertempermeabilitas rendah berpotensi memungkinkan pembangkitan listrik di wilayah yang sebelumnya tidak dilirik. Secara keseluruhan, berbagai aplikasi ini menunjukkan fleksibilitas energi panas bumi dalam memenuhi kebutuhan energi Indonesia yang terus meningkat, sekaligus mendukung tujuan keberlanjutan dan dekarbonisasi. (Untuk informasi lebih lanjut, lihat Bab 4, "Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung" untuk informasi lebih lanjut.)

TOTAL POTENSI SUMBER DAYA PANAS BUMI

Untuk memvisualisasikan sebaran spasial sumber daya panas bumi di seluruh Indonesia, tanpa memandang jenis sumber dayanya, Project InnerSpace menghasilkan peta seperti yang ditampilkan pada **Gambar 3.15**, yang menyoroti wilayah daratan dengan potensi teoretis panas bumi terbesar. Potensi teoretis panas bumi mengacu pada pasokan energi yang dapat dimanfaatkan secara fisik atau heat-in-place (HiP). Set data dasar dihasilkan menggunakan metode HiP, mengikuti pendekatan Pocasangre dan Fujimitsu.[3] Metode ini membagi total panas bawah permukaan menjadi dua komponen: panas

PETA SUMBER DAYA PANAS BUMI INDIA



Gambar 3.15: Peta sumber daya panas bumi Indonesia yang mengidentifikasi wilayah-wilayah paling sesuai untuk pengembangan teknologi panas bumi berdasarkan karakteristik panas dan kondisi bawah permukaan. Analisis ini menggunakan Weighted Overlay Analysis dari Project InnerSpace, yang dirancang untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan area berpotensi panas bumi tinggi berdasarkan faktor-faktor geologi dan geofisika utama. Sumber: Project InnerSpace. (2025). *Indonesia Weighted Overlay Analysis Data Set*.



yang tersimpan dalam matriks batuan dan panas yang berada dalam fluida pori.

Peta tersebut menyajikan estimasi HiP dalam satuan petajoule per kilometer persegi (PJ/km^2) untuk interval setebal 3.000 meter, dari kedalaman 0 hingga 3.000 meter, dengan menerapkan batas minimum temperatur bawah permukaan sebesar 150°C.

Peta pada **Gambar 3.15** menunjukkan zona hangat yang luas di luar busur vulkanik Indonesia, dengan nilai yang menonjol di seluruh cekungan sedimen Sumatra Tengah dan Selatan, serta wilayah yang berada di atas batuan dasar granit dan metamorf di Jawa, Sumatra, dan Sulawesi. Area-area ini — yang memiliki permeabilitas alami rendah namun temperatur bawah permukaan yang tinggi — merupakan kandidat kuat untuk teknologi panas bumi generasi berikutnya, yang mengandalkan reservoir rekayasa untuk meningkatkan sirkulasi fluida dan pemulihan panas. Selain itu, formasi vulkanik dan vulkanik-sedimen di sekitar lapangan hidrotermal yang sudah ada menawarkan target near-field yang tidak konvensional, di mana teknologi generasi berikutnya dapat memperluas pemanfaatan sumber daya di luar sistem panas bumi konvensional.

Pada akhir tahun 2024, International Energy Agency (IEA) menerbitkan sebuah analisis mengenai energi panas teknis yang disediakan oleh sumber daya panas bumi di seluruh dunia.[4] Analisis tersebut mengandalkan perhitungan data bawah permukaan dari GeoMap milik Project InnerSpace untuk memperkirakan potensi sumber daya. Laporan tersebut menghitung jumlah energi panas bumi yang dapat dipulihkan pada berbagai titik harga berdasarkan teknologi yang tersedia saat ini. Untuk Indonesia, tim menghitung potensi teknis kumulatif panas bumi dalam satuan gigawatt listrik (GWe), yang diturunkan dari estimasi heat-in-place (HiP) untuk interval isopach setebal 5.000 meter dari kedalaman 0 hingga 5.000 meter, dengan menggunakan temperatur minimum bawah permukaan sebesar 150 °C. Dengan menggunakan metodologi Augustine[5], tim mengonversi petajoule menjadi gigawatt dengan mempertimbangkan faktor pemulihan (20%), capacity factor (0,9), efisiensi (dihitung sebagai fungsi temperatur), dan umur pembangkit (20 tahun).

Data dari Project InnerSpace menunjukkan bahwa jika Indonesia mengembangkan seluruh sumber daya panas bumi yang tersedia dalam 5 kilometer pertama bawah permukaan (tidak termasuk kawasan lindung), negara ini akan memiliki potensi teknis panas bumi sebesar 2.160 gigawatt—atau lebih dari 21 kali total kapasitas terpasang Indonesia pada tahun 2024, dan dua orde magnitudo lebih besar dari estimasi potensi panas bumi konvensional saat ini. Potensi teknis ini merupakan sebagian kecil dari potensi teoretis yang dapat dimanfaatkan dengan teknologi yang tersedia saat ini.

SUMBER DAYA PANAS BUMI KONVENSIONAL DAN GENERASI BERIKUTNYA DI INDONESIA

Peta pada **Gambar 3.16** menunjukkan sebaran potensi panas bumi di Indonesia dan membantu mengidentifikasi area yang sesuai untuk berbagai jenis pengembangan. Peta ini membedakan beberapa jenis sumber daya panas bumi berikut:

- Konvensional (pembangkit hidrotermal)
- Panas bumi generasi berikutnya (untuk pembangkit listrik)
- Panas bumi generasi berikutnya (untuk pemanfaatan langsung), meliputi:
    - Pemanfaatan langsung dan pendinginan distrik (district cooling)
    - Pemanas dan pendingin industri bersuhu rendah
    - Pemanas dan pendingin berbasis panas bumi

Kategori-kategori ini berasal dari weighted overlay analysis GeoMap,[6,7] sebuah metode berbasis GIS yang menggabungkan berbagai data geologi dan geofisika, kemudian memberikan bobot relatif pada setiap faktor untuk mengidentifikasi area dengan potensi panas bumi terbesar. Peta yang dihasilkan menonjolkan zona busur vulkanik—wilayah dengan konsentrasi potensi dan cadangan panas bumi hidrotermal konvensional—serta area near field dan batuan panas kering (hot dry rock) lainnya yang menawarkan kondisi menjanjikan



bagi pengembangan panas bumi generasi berikutnya untuk pembangkit listrik. Di luar area tersebut, cekungan sedimen yang luas membuka peluang untuk pemanfaatan langsung panas bumi, termasuk sistem pendinginan dan pemanasan.

Bersama-sama, pola-pola ini menggambarkan beragam peluang geotermal yang sudah mapan maupun yang sedang berkembang di seluruh basis sumber daya yang beragam di Indonesia.

Bab 1, "Panas bumi 101: Gambaran Umum tentang Teknologi dan Aplikasi Panas Bumi Terbaru," Secara keseluruhan, pola-pola ini menunjukkan beragam peluang panas bumi, baik yang sudah mapan maupun yang baru berkembang, di tengah kekayaan sumber daya Indonesia yang sangat bervariasi.

Sumber Daya Hidrotermal Konvensional

Industri panas bumi Indonesia sebagian besar bergantung pada sistem hidrotermal yang berada di kawasan vulkanik sepanjang busur vulkanik Sunda-Banda, yang membentang dari Sumatra, Jawa, Bali, Flores, hingga sebagian Sulawesi. Zona vulkanik aktif ini menjadi lokasi lapangan panas bumi paling produktif di Indonesia, termasuk Gunung Salak (Jawa Barat), Sarulla (Sumatra Utara), Darajat (Jawa Barat), Kamojang (Jawa Barat), Wayang Windu (Jawa Barat), dan Ulubelu (Sumatra Selatan).

Sebagian besar pembangkit listrik panas bumi di Indonesia memanfaatkan sumber daya hidrotermal berentalpi tinggi, yang umumnya diolah menggunakan pembangkit tipe flash. Di antara fasilitas tersebut, Gunung Salak dan Sarulla—keduanya menggunakan teknologi flash—menonjol bukan hanya sebagai pembangkit terbesar di Indonesia, tetapi juga termasuk dalam 10 pembangkit listrik panas bumi terbesar di dunia. Sebagian kecil produksi berasal dari sistem uap kering (dry steam), seperti yang beroperasi di Kamojang dan Darajat di Jawa Barat.

Sumber Daya Pembangkit Listrik Panas Bumi Generasi Berikutnya

Sistem pembangkit listrik panas bumi generasi berikutnya menawarkan potensi untuk memperluas produksi listrik panas bumi di luar wilayah vulkanik Indonesia. Teknologi ini memungkinkan ekstraksi panas tidak hanya dari batuan vulkanik yang secara alami permeabel, tetapi juga dari formasi bertempermeabilitas rendah di area sekitar maupun wilayah non-vulkanik. Pendekatan generasi berikutnya menunjukkan potensi pada formasi granit Indonesia dengan produksi panas radiogenik tinggi, kompleks metamorf, dan tipe batuan dasar kristalin lainnya, termasuk sabuk granit timah di Bangka Belitung; batuan dasar Cekungan Sumatra Selatan; serta kompleks granit di Kalimantan, Papua Barat, dan Sulawesi Tengah.

Sumber Daya Direct-Use Panas Bumi Generasi Berikutnya

Sementara sistem panas bumi konvensional dan generasi berikutnya terutama berfokus pada produksi listrik dari sumber daya bertemperatur tinggi, pendekatan baru memperluas potensi panas bumi ke lingkungan bertemperatur sedang seperti cekungan sedimen. Perubahan ini menggeser pemanfaatan panas bumi dari sekadar pembangkit listrik menuju aplikasi direct-use yang lebih luas, termasuk pendinginan dan pemanasan, yang dapat meningkatkan efisiensi energi dan mendukung tujuan dekarbonisasi.

Dalam iklim tropis Indonesia, di mana kebutuhan pemanas ruangan rendah, peluang direct-use panas bumi lebih relevan untuk proses industri, kegiatan pertanian, pendinginan distrik (district cooling) bagi kawasan komersial atau permukiman besar, serta operasi pusat data. Bersama-sama, peluang ini menunjukkan bagaimana energi panas bumi dapat menyediakan solusi pemanasan dan pendinginan rendah karbon secara terus-menerus di berbagai lingkungan, melengkapi pembangkit listrik dan meningkatkan ketahanan energi secara keseluruhan. Untuk informasi lebih lanjut tentang peluang pendinginan dan pemanasan di Indonesia, lihat Bab 4, Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung.

Pendinginan Panas Bumi Generasi Berikutnya

Cekungan sedimen di seluruh Indonesia menawarkan kondisi yang sangat mendukung untuk pendinginan panas bumi, dengan karakteristik porositas tinggi, permeabilitas baik, dan temperatur sedang berkisar



40°C hingga 150°C. Kondisi geologi ini memberikan landasan optimal bagi sistem pendinginan panas bumi generasi berikutnya yang memanfaatkan kapasitas pertukaran panas alami bumi untuk menghasilkan solusi pendinginan yang efisien dan rendah karbon.

Pendinginan panas bumi generasi berikutnya merujuk pada penggunaan reservoir panas bumi atau sistem ground source untuk menggantikan pendingin udara konvensional yang intensif energi, dengan alternatif yang lebih berkelanjutan dan hemat energi. Seiring proyeksi peningkatan tajam permintaan pendinginan di Indonesia dalam beberapa dekade mendatang, teknologi pendinginan panas bumi seperti *ground source heat pumps* (GSHPs) dan *district cooling networks* (DCNs) menawarkan jalur berskala besar untuk menurunkan konsumsi listrik, mengurangi tekanan pada jaringan listrik, dan meningkatkan ketahanan iklim. Selain itu, aplikasi pendinginan pusat data dapat memanfaatkan loop panas bumi atau sistem akuifer untuk membuang panas limbah dan menjaga temperatur yang stabil sepanjang tahun. Lihat Bab Bab 4, Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung untuk mendapatkan wawasan lebih lanjut tentang panas bumi dan pusat data.

Panas Bumi Generasi Berikutnya untuk Kebutuhan Panas Industri

Beberapa cekungan sedimen di seluruh Indonesia menunjukkan potensi kuat untuk penyediaan panas bumi generasi berikutnya, terutama di wilayah yang memiliki sumber daya bertemperatur sedang (40°C–150°C) dan berdekatan dengan koridor industri utama serta pusat pengolahan hasil pertanian. Di Cekungan Dieng, Jawa Tengah, panas bumi direncanakan untuk digunakan pada rumah kaca (*greenhouse*) yang mendukung komoditas bernilai tinggi seperti jeruk, alpukat, dan kopi. Di Sumatra Selatan, formasi sedimen dapat dimanfaatkan untuk pengawetan ikan dan pengolahan tebu, sementara di Jawa Timur, gradien panas bumi serupa berdekatan dengan industri susu dan tekstil yang membutuhkan pasokan panas stabil di bawah 150°C. Contoh-contoh ini (diambil dari Bab 4, Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung") menunjukkan bagaimana sistem panas bumi sedimen—karena sifat permeabilitas, porositas, dan penyebarannya yang luas—dapat menyediakan panas proses yang andal dan rendah karbon untuk industri serta pusat pengolahan hasil pertanian, menawarkan jalur praktis untuk mendekarbonisasi sektor manufaktur dan pertanian Indonesia.

KESIMPULAN

Di Indonesia, meskipun wilayah vulkanik menunjukkan gradien panas tertinggi, sistem konduktif yang sangat luas mendominasi sebagian besar bawah permukaan nusantara. Cekungan sedimen dan wilayah batuan kristalin mengandung energi panas yang cukup untuk mendukung ratusan gigawatt listrik bersih, panas untuk penggunaan langsung, dan pendinginan rendah karbon. Dengan menggunakan metodologi yang sama dengan yang mendasari laporan Future of Geothermal dari IEA, penilaian skala nasional Project InnerSpace menemukan bahwa basis sumber daya panas bumi Indonesia jauh lebih besar dan lebih beragam daripada yang selama ini diperkirakan, dan melampaui sistem hidrotermal konvensional. Project InnerSpace memperkirakan lebih dari 2.000 gigawatt potensi teknis panas bumi berada dalam kedalaman 5 kilometer pertama (di luar kawasan lindung), dua tingkat besaran lebih tinggi dibandingkan estimasi potensi hidrotermal saat ini. Dengan memanfaatkan panas bawah permukaan untuk listrik, pemanas, dan pendinginan, Indonesia dapat mengubah keragaman geologinya menjadi fondasi bagi pertumbuhan berkelanjutan dan rendah karbon.



INFORMASI SUMBER TAMBAHAN

Referensi Gambar 3.5

Abbott, D. H., & Rubenstone, J. L. (2024). The abundance of submarine volcanism in arcs. *Volcanica*, *7*(2), 447–459. https://doi.org/10.30909/vol.07.02.447459

Aryanto, N. C. D., Kurnio, H., Tuakia, M. Z., Tampubolon, A., Pardiarto, B., Widi, B. N., Widodo, W., & Kusnawan. (2023). Quaternary seabed sediment characteristics as an indication of VMS-mineral deposits at the South Banda Basin and its surroundings, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1163*, 012015. http://doi.org/10.1088/1755-1315/1163/1/012015

Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation. (2021). *Types of volcanoes in Indonesia (A, B, and C).* MAGMA Indonesia. https://magma.esdm.go.id/v1/edukasi/tipe-gunung-api-di-indonesia-a-b-dan-c

Darman, H. (Ed.). (2021). *Geothermal gradient map of Southeast Asia*. INDOGEO Social Enterprise.

Flanders Marine Institute. (n.d.). *Marine regions*. www.marineregions.org

Indonesian Geological Agency. (2023). *Geothermal area distribution map and its resource in Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Kurnio, H., Lubis, S., & Widi, H. C. (2015). Submarine volcano characteristics in Sabang waters. *Bulletin of Marine Geology*, *30*(2), 85–96. https://doi.org/10.32693/bomg.30.2.2015.78

Raharjo, P., Mellawati, J., & Sbs, Y. (2016). Analisis supposed capable fault sebagai data dukung rencana rapak PLTN Bojonegara, Propinsi Banten. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, *18*, 39–48. https://doi.org/10.17146/jpen.2016.18.1.2857

Špičák, A., Matějková, R., & Vaněk, J. (2013). Seismic response to recent tectonic processes in the Banda Arc region. *Journal of Asian Earth Sciences*, *64*, 1–13. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.014

Sukamto, R. (2010). *Regional geological map*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Sukamto, R., Ratman, N., & Simandjuntak, T. O. (Eds.). (2011). *Geological map of Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources.



Gambar 3.6 Daftar Referensi

Abbott, D. H., & Rubenstone, J. L. (2024). The abundance of submarine volcanism in arcs. *Volcanica*, *7*(2), 447–459. https://doi.org/10.30909/vol.07.02.447459

Aryanto, N. C. D., Kurnio, H., Tuakia, M. Z., Tampubolon, A., Pardiarto, B., Widi, B. N., Widodo, W., & Kusnawan. (2023). Quaternary seabed sediment characteristics as an indication of VMS-mineral deposits at the South Banda Basin and its surroundings, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1163*, 012015. http://doi.org/10.1088/1755-1315/1163/1/012015

Darman, H. (Ed.). (2021). *Geothermal gradient map of Southeast Asia*. INDOGEO Social Enterprise.

Flanders Marine Institute. (n.d.). *Marine regions*. www.marineregions.org

Kurnio, H., Lubis, S., & Widi, H. C. (2015). Submarine volcano characteristics in Sabang waters. *Bulletin of Marine Geology*, 30(2), 85–96. https://doi.org/10.32693/bomg.30.2.2015.78

Raharjo, P., Mellawati, J., & Sbs, Y. (2016). Analisis supposed capable fault sebagai data dukung rencana rapak PLTN Bojonegara, Propinsi Banten. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, *18*, 39–48. https://doi.org/10.17146/jpen.2016.18.1.2857

Špičák, A., Matějková, R., & Vaněk, J. (2013). Seismic response to recent tectonic processes in the Banda Arc region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 1–13. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.014

Sukamto, R., Ratman, N., & Simandjuntak, T. O. (Eds.). (2011). *Geological map of Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Gambar 3.8 Daftar Referensi

Abbott, D. H., & Rubenstone, J. L. (2024). The abundance of submarine volcanism in arcs. *Volcanica*, *7*(2), 447–459. https://doi.org/10.30909/vol.07.02.447459

Aryanto, N. C. D., Kurnio, H., Tuakia, M. Z., Tampubolon, A., Pardiarto, B., Widi, B. N., Widodo, W., & Kusnawan. (2023). Quaternary seabed sediment characteristics as an indication of VMS-mineral deposits at the South Banda Basin and its surroundings, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1163*, 012015. http://doi.org/10.1088/1755-1315/1163/1/012015

Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation. (2021). *Types of volcanoes in Indonesia (A, B, and C)*. MAGMA Indonesia. https://magma.esdm.go.id/v1/edukasi/tipe-gunung-api-di-indonesia-a-b-dan-c

Flanders Marine Institute. (n.d.). *Marine regions*. www.marineregions.org

Hamilton, W. (1979). *Tectonics of the Indonesian Region*. U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/pp/1078/report.pdf

Indonesian Geological Agency. (2023). *Geothermal area distribution map and its resource in Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Kurnio, H., Lubis, S., & Widi, H. C. (2015). Submarine volcano characteristics in Sabang waters. *Bulletin of Marine Geology*, *30*(2), 85–96. https://doi.org/10.32693/bomg.30.2.2015.78

Mooney, W. D., Barrera-Lopez, C., Suarez, M. G., & Castelblanco, M. A. (2024). *Earth Crustal Model 1 (ECM1): A 1°x 1° global seismic and density model*. Earth Crust Model. https://www.earthcrustmodel1.com/

Ng, S. W.-P., Whitehouse, M. J., Roselee, M. H., Teschner, C., Murtadha, S., Oliver, G. J. H., Ghani, A. A., & Chang, S.-C. (2017). Late Triassic granites from Bangka, Indonesia: A continuation of the Main Range granite province of the South-East Asian Tin Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, *138*, 548–561. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.03.002



Raharjo, P., Mellawati, J., & Sbs, Y. (2016). Analisis supposed capable fault sebagai data dukung rencana rapak PLTN Bojonegara, Propinsi Banten. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, 18*, 39–48. https://doi.org/10.17146/jpen.2016.18.1.2857

Špičák, A., Matějková, R., & Vaněk, J. (2013). Seismic response to recent tectonic processes in the Banda Arc region. *Journal of Asian Earth Sciences*, *64*, 1–13. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.014

Sukamto, R. (2010). *Regional geological map*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Sukamto, R., Ratman, N., & Simandjuntak, T. O. (Eds.). (2011). *Geological map of Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Gambar 3.10 Daftar Referensi

Abbott, D. H., & Rubenstone, J. L. (2024). The abundance of submarine volcanism in arcs. *Volcanica*, *7*(2), 447–459. https://doi.org/10.30909/vol.07.02.447459

Aryanto, N. C. D., Kurnio, H., Tuakia, M. Z., Tampubolon, A., Pardiarto, B., Widi, B. N., Widodo, W., & Kusnawan. (2023). Quaternary seabed sediment characteristics as an indication of VMS-mineral deposits at the South Banda Basin and its surroundings, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1163, 012015. http://doi.org/10.1088/1755-1315/1163/1/012015

Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation. (2021). *Types of volcanoes in Indonesia (A, B, and C)*. MAGMA Indonesia. https://magma.esdm.go.id/v1/edukasi/tipe-gunung-api-di-indonesia-a-b-dan-c

Darman, H. (Ed.). (2019). *Cenozoic sediment isochore map*. INDOGEO Social Enterprise.

Darman, H. (Ed.). (2021). *Geothermal gradient map of Southeast Asia*. INDOGEO Social Enterprise.

Flanders Marine Institute. (n.d.). *Marine regions*. www.marineregions.org

Indonesian Geological Agency. (2023). *Geothermal area distribution map and its resource in Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Kurnio, H., Lubis, S., & Widi, H. C. (2015). Submarine volcano characteristics in Sabang waters. *Bulletin of Marine Geology*, *30*(2), 85–96. https://doi.org/10.32693/bomg.30.2.2015.78

Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2022). *Sedimentary basin map of Indonesia*. Government of Indonesia.

Raharjo, P., Mellawati, J., & Sbs, Y. (2016). Analisis supposed capable fault sebagai data dukung rencana rapak PLTN Bojonegara, Propinsi Banten. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 18, 39–48. https://doi.org/10.17146/jpen.2016.18.1.2857

Špičák, A., Matějková, R., & Vaněk, J. (2013). Seismic response to recent tectonic processes in the Banda Arc region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 1–13. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.11.014

Sukamto, R., Ratman, N., & Simandjuntak, T. O. (Eds.). (2011). *Geological map of Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Gambar 3.12 Daftar Referensi

Flanders Marine Institute. (n.d.). *Marine regions*. www.marineregions.org

Indonesian Geological Agency. (2023). *Geothermal area distribution map and its resource in Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Mooney, W. D., Barrera-Lopez, C., Suarez, M. G., & Castelblanco, M. A. (2024). *Earth Crustal Model 1 (ECM1): A 1°x 1° global seismic and density model*. Earth Crust Model. https://www.earthcrustmodel1.com/

Raharjo, P., Mellawati, J., & Sbs, Y. (2016). Analisis supposed capable fault sebagai data dukung rencana rapak PLTN Bojonegara, Propinsi Banten. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, 18*, 39–48. https://doi.org/10.17146/jpen.2016.18.1.2857

Setiawan, N. I., Osanai, Y., Nakano, N., Adachi, T., Yonemura, K., Yoshimoto, A., Setiadji, L. D., Mamma, K., & Wahyudiono, J. (2012). Geocehmical characteristic of metamorphic rocks from South Sulawesi, Central Java, South and West Kalimantan in Indonesia. *ASEAN Engineering Journal, 3*(1), 107–127. https://doi.org/10.11113/aej.v3.15399

Sukamto, R. (2010). *Regional geological map*. Ministry of Energy and Mineral Resources.

Sukamto, R., Ratman, N., & Simandjuntak, T. O. (Eds.). (2011). *Geological map of Indonesia*. Ministry of Energy and Mineral Resources.



REFERENSI BAB 3, BAGIAN 1

1 Radja, V. T. (1975). Overview of geothermal energy studies in Indonesia. In *Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources* (pp. 233–240). United Nations. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1448602

2 Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2008). History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000. *Geothermics*, *37*(3), 220–266. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.01.001

3 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2023). *Profile of Indonesia's geothermal potential: Volumes 1 and 2*. Directorate of Geothermal, Directorate of New, Renewable Energy, and Energy Conservation, Ministry of Energy and Mineral Resources, Republic Indonesia.

4 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Exploration activities by geothermal permit holder business entities* [Presentation]. Republic of Indonesia. Used with permission.

5 Cariaga, C. (2025, January 20). *ThinkGeoEnergy's top 10 geothermal countries 2024-power*. ThinkGeoEnergy. https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2024-power

6 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *National Electricity General Plan 2024–2060*. Government of Indonesia. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/28dd4-rukn.pdf

7 Hamilton, W. (1979). *Tectonics of the Indonesian region*. U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/pp/1078/report.pdf

8 Simandjuntak, T. O., & Barber, A. J. (1996). Contrasting tectonic styles in the Neogene orogenic belts of Indonesia. *Geological Society, London, Special Publications*, *106*, 185–201. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1996.106.01.12

9 Hall, R. (2012). Sundaland and Wallacea: Geology, plate tectonics and palaeogeography. In D. Gower, K. Johnson, J. Richardson, B. Rosen, L. Rüber, & S. Williams (Eds.), *Biotic evolution and environmental change in Southeast Asia* (pp. 32–78). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9780511735882.005



10 Muffler, P., & Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, *7*(2–4), 53–89. https://doi.org/10.1016/0375-6505(78)90002-0

11 MAGMA Indonesia. (n.d.). *MAGMA Indonesia*. https://magma.vsi.esdm.go.id

12 Geological Agency. (2023). *Geothermal area distribution map and its resource in Indonesia*. Republic of Indonesia.

13 Purnomo, B. J., & Pichler, T. (2014). Geothermal systems on the island of Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *285*, 47–59. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.004

14 Hiriart, G., María Prol-Ledesma, R., Alcocer, S., & Espíndola, S. (2010). Submarine geothermics: Hydrothermal vents and electricity generation. In *Proceedings World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia. https://www.researchgate.net/publication/265822950_Submarine_Geothermics_Hydrothermal _Vents_and_Electricity_Generation

15 Suárez-Arriaga, M.-C., Jochen Bundschuh, J., & Samaniego, F. (2014). Assessment of submarine geothermal resources and development of tools to quantify their energy potentials for environmentally sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, *83*, 21–32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.040

16 Kurnio, H., Lubis, S., & Widi, H. C. (2015). Submarine volcano characteristics in Sabang waters. *Bulletin of Marine Geology*, *30*(2), 85–96. https://doi.org/10.32693/bomg.30.2.2015.78

17 Kurnio, H., & Usman, E. (2016). Rare earth elements vapor transport by fumaroles in the post caldera complex of Weh Island Submarine Volcano, Aceh Province Northern Sumatra. *Bulletin of Marine Geology*, *31*(2), 99–108. https://doi.org/10.32693/bomg.31.2.2016.317

18 McConachy, T. F., Permana, H., Binns, R. A., Zulkarnain, I., Parr, J. M., Yeats, C. J., Hananto, N. D., Priadi, B., Burhanuddin, S., & Utomo, E. P. (2004). Recent investigations of submarine hydrothermal activity in Indonesia. In *Proceedings of PACRIM 2004: Exploration, mining, and processing*. Adelaide, Australia. https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/pacrim-2004/recent-investigations-of-submarine-hydrothermal-activity-in-indonesia

19 McConachy et al., 2004.

20 Prol-Ledesma, R. M. (2003). Similarities in the chemistry of shallow submarine hydrothermal vents. *Geothermics*, *32*(4-6), 639–644. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2003.06.003

21 Suárez-Bosche, N. E., Suárez-Arriaga, M.-C., Samaniego, F., & Delgado, V. (2005). Fundamental characteristics of hydrothermal submarine systems and preliminary evaluation of its geothermal potential in Mexico. In *Proceedings World Geothermal Congress 2005*. Antalya, Turkey. https://worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/WGC/2005/1604.pdf

22 Pichler, T. (2005). Stable and radiogenic isotopes as tracers for the origin, mixing and subsurface history of fluids in submarine shallow-water hydrothermal systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *139*(3–4), 211–226. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.08.007

23 Hocking, M. W. A., Hannington, M. D., Percival, J. B., Stoffers, P., Schwarz-Schampera, U., & de Ronde, C. E. J. (2010). Clay alteration of volcaniclastic material in a submarine geothermal system, Bay of Plenty, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *191*(3–4), 180–192. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.01.018

24 de Ronde, C. E. J., Massoth, G. J., Butterfield, D. A., Christenson , B. W., Ishibashi , J., Ditchburn, R. G., Hannington, M. D., Brathwaite , R. L., Lupton, J. E., Kamenetsky, V. S., Graham, I. J., Zellmer, G. F., Dziak , R. P., Embley, R. W., Dekov, V. M., Munnik, F., Lahr, J., Evans, L. J., & Takai, K. (2011). Submarine hydrothermal activity and gold-rich mineralization at Brothers Volcano, Kermadec Arc, New Zealand. *Mineralium Deposita*, *46*, 541–584. https://doi.org/10.1007/s00126-011-0345-8



25 Yamanaka, T., Maeto, K., Akashi, H., Ishibashi, J. I., Miyoshi, Y., Okamura, K., Noguchi, T., Kuwahara, Y., Toki, T., Tsunogai, U., Ura, T., Nakatani, T., Maki, T., Kubokawa, K., & Chiba, H. (2013). Shallow submarine hydrothermal activity with significant contribution of magmatic water producing talc chimneys in the Wakamiko Crater of Kagoshima Bay, southern Kyushu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *258*, 74–84. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.04.007

26 Arango-Galván, C., Prol-Ledesma, R. M., & Torres-Vera, M. A. (2015). Geothermal prospects in the Baja California Peninsula. *Geothermics*, *55*, 39–57. http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.01.005

27 Reinsch, T., Dobson, P., Asanuma, H., Huenges, E., Poletto, F., & Sanjuan, B. (2017). Utilizing supercritical geothermal systems: A review of past studies and ongoing research activities. *Geothermal Energy*, *5*, 16. https://doi.org/10.1186/s40517-017-0075-y

28 Ishitsuka, K., Yamaya, Y., Watanabe, N., Kobayashi, Y., Mogi, T., Asanuma, H., Kajiwara, T., Sugiomoto, T., & Saito, R. (2022). Constraining temperature at depth of the Kakkonda geothermal field, Japan, using Bayesian rock-physics modelling of resistivity: Implications to the deep hydrothermal system. *Geothermics*, *100*, 102316. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102316

29 Hashida, T., Hayashi, K., Niitsuma, H., Matsuki, K., Tsuchiya, N., & Nakatsuka, K. (2000). Investigation of heat extraction from supercritical geothermal reservoirs. In *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. Tohoku, Japan. https://worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0616.PDF

30 Fridleifsson, G. Ó., Elders, W. A., Zierenberg, R. A., Fowler, A. P. G., Weisenberger, T. B., Mesfin, K. G., Sigurðsson, Ó., Níelsson, S., Einarsson, G., Óskarsson, F., Guðnason, E. Á., Tulinius, H., Hokstad, K., Benoit, G., Nono, F., Loggia, D., Parat, F., Cichy, S. B., Escobedo, D., & Mainprice, D. (2020). The Iceland Deep Drilling Project at Reykjanes: Drilling into the root zone of a black smoker analog. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *391*, 106435. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.013

31 Fridleifsson, G. O., Bogason, S. G., Stoklosa, A. W., Ingolfsson, H. P., Vergnes , P., Thorbjörnsson, I. Ö., Peter-Borie, M., Kohl, T., Edelmann, T., Bertani, R., Sæther, S., & Palsson, B. (2016). *Deployment of deep enhanced geothermal systems for sustainable energy business* [Presentation]. European Geothermal Congress. https://www.researchgate.net/publication/306056421

32 Geothermal: The Next Generation (2025). *GNG publications (2020–2025)*. https://www.geothermalnextgeneration.com/updates/gng-publications-2020-2025

33 Newhall, C. G., & Dzurisin, D. (1988). Historical unrest at large calderas of the world. *U.S. Geological Survey Bulletin*, *1855*. U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/bul/1855/report.pdf

34 Utami, P., Sidqi, M., Siahaan, Y., Shalihin, M. G. J., Siahaan, E. E., & Silaban, M. (2021). Geothermal prospects in Lahendong Geothermal Field of the Tomohon–Minahasa Volcanic Terrain (TMVT), North Sulawesi, Indonesia. In *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland. https://worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/12050.pdf

35 Utami, P. (2011). *Hydrothermal alteration and the evolution of the Lahendong Geothermal System, North Sulawesi, Indonesia* [Doctoral thesis]. University of Auckland. https://researchspace.auckland.ac.nz/items/eb5639ed-443b-40f4-9dc8-39594428a0d9

36 Chesner, C.A. (2012). The Toba Caldera Complex. *Quaternary International*, *258*, 5–18. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.025

37 Julio, L., Ratna, W. S., Siregar, I. R., & Pranowo, W. (2023). Early results of modelling subsurface study in Lake Toba, North Sumatra using receiver function. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1227*, 012048. http://doi.org/10.1088/1755-1315/1227/1/012048

38 Hall, 2012.

39 Tilling, R. I., & Gottfried, D. (1969). *Distribution of thorium, uranium, and potassium in igneous rocks of the Boulder Batholith Region, Montana, and its bearing on radiogenic heat production and heat flow*. U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/pp/0614e/report.pdf

40 Rafiq, J., Abu-Mahfouz, I. S., & Whattam, S. (2025). Petrogenesis, radiogenic heat production, and geothermal potential of host rocks in the Al-Lith geothermal system, Western Saudi Arabia. *Renewable Energy*, *250*, 123362. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123362

41 Tye, A. M., Milodowski, A. E., & Smedley, P. L. (2017). *Distribution of natural radioactivity in the environment*. British Geological Survey. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/516158/1/OR17001.pdf

42 Olasolo, P., Juárez, M. C., Morales, M. P., D'Amico, S., & Liarte, I. A. (2016). Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 133–144. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031

43 Liao, Y., Wang, G., Xi, Y., Gan, H., Yan, X., Yu, M., Zhang, W., & Zhao, Z. (2024). Petrogenesis of high heat producing granites and their contribution to geothermal resource in the Huangshadong geothermal field, South China. *Frontiers in Earth Science*, 12. https://doi.org/10.3389/feart.2024.1342969

44 Evans, K. F., Moriya, H., Niitsuma, H., Jones, R. H., Phillips, W. S., Genter, A., Sausse, J., Jung, R., & Baria, R. (2005). Microseismicity and permeability enhancement of hydrogeologic structures during massive fluid injections into granite at 3 km depth at the Soultz HDR site. *Geophysical Journal International*, *160*(1), 389–412. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02474

45 Khair, H. A., Cooke, D., & Hand, M. (2015). Seismic mapping and geomechanical analyses of faults within deep hot granites, a workflow for enhanced geothermal system projects. *Geothermics*, *53*, 46–56. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.04.007

46 Koelbel, T., & Genter, A. (2017). Enhanced geothermal systems: The Soultz-sous-Forêts project. In T. Uyar (Ed.), *Towards 100% renewable energy* (Springer Proceedings in Energy). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45659-1_25

47 Siregar, R. N., Nukman, M., Widana, K. S., Harijoko, A., & Sismanto, S. (2024). Radiogenic geothermal systems of Bangka Island, Indonesia: Implications of high heat production and tectonic framework. *Energy Geoscience*, *5*(4), 100306. https://doi.org/10.1016/j.engeos.2024.100306



48 Limberger, J., Boxem, T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calcagno, P., Beekman, F., Cloetingh, S., & van Wees, J.-D. (2018). Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 961–975. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.084

49 Procesi, M., Ciotoli, G., Mazzini, A., & Etiope, G. (2019). Sediment-hosted geothermal systems: Review and first global mapping. *Earth-Science Reviews*, *192*, 529–544. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.020

50 Ciotoli, G., Etiope, G., Marra, F., Florindo, F., Giraudi, C., & Ruggiero, L. (2016). Tiber delta CO2-CH4 degassing: A possible hybrid, tectonically active sediment-hosted geothermal system near Rome. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *121*(1), 48–69. https://doi.org/10.1002/2015jb012557

51 Zaputlyaeva, A., Mazzini, A., Blumenberg, M., Scheeder, G., Kürschner, W. M., Kus, J., Jones, M. T., & Frieling, J. (2020). Recent magmatism drives hydrocarbon generation in North-east Java, Indonesia. *Scientific Reports*, *10*, 1786. https://doi.org/10.1038/s41598-020-58567-6

52 Muttaqy, F., Nugraha, A. D., Mori, J., Puspito, N. T., Supendi, P., & Rohadi, S. (2022). Seismic imaging of lithospheric structure beneath Central-East Java Region, Indonesia: Relation to recent earthquakes. *Frontiers in Earth Science*, *10*, 756806. https://doi.org/10.3389/feart.2022.756806

53 McKenna, T. E., & Sharp Jr., J. M. (1998). Radiogenic heat production in sedimentary rocks of the Gulf of Mexico Basin, South Texas. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, *82*(3), 484–496. https://pubs.usgs.gov/publication/70021152

54 Limberger et al., 2018.

55 Beardsmore, G. R. (2024). A review of hot sedimentary aquifer geothermal resources in Australia. New Zealand *Journal of Geology and Geophysics*, *68*(3), 378–398. https://doi.org/10.1080/00288306.2024.2374065.



56 Kolawole, F., & Evenick, J. C. (2023). Global distribution of geothermal gradients in sedimentary basins. *Geoscience Frontiers*, *14*(6), 101685. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101685

57 Nurhuda, R., Aristo, M. K. A., Azizah, M. J. N., & Suryantini. (2023). Assessment of hot sedimentary aquifer (HSA) resources potential in Central Sumatra Basin, Indonesia. In *Proceedings, the 9th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE) 2023*. Jakarta, Indonesia. https://www.researchgate.net/publication/375667104_Assessment_of_Hot_Sedimentary_Aquifer_HSA_Resources_Potential_in_Central_Sumatra_Basin_Indonesia

58 Clements, B., Hall, R., Smyth, H. R., & Cottam, M. G. (2009). Thrusting of a volcanic arc: A new structural model for Java. *Petroleum Geoscience*, *15*, 159–174. https://doi.org/10.1144/1354-079309-831

59 Cano, N. A., Céspedes, S., Redondo, J., Foo, G., Jaramillo, D., Martinez, D., Gutiérrez, M., Pataquiba, J., Rojas, J., Cortés, F. B., & Franco, C. A. (2022). Power from geothermal resources as a co-product of the oil and gas Industry: A review. *ACS Omega*, *7*(45), 40603–40624. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04374

60 Clements et al., 2009.

61 Gizzi, M., Taddia, G., & Lo Russo, S. (2021). Reuse of decommissioned hydrocarbon wells in Italian oilfields by means of a closed-loop geothermal system. *Applied Sciences*, *11*(5), 2411. https://doi.org/10.3390/app11052411

62 Ingebritsen, S., & Gleeson, T. (2017). Crustal permeability. *Hydrogeology Journal*, 25, 2221–2224. https://doi.org/10.1007/s10040-017-1663-4

63 Villeneuve, M., Gunawan, W., Cornee, J.-J., & Vidal, O. (2001). Geology of the central Sulawesi belt (eastern Indonesia): Constraints for geodynamic models. *International Journal of Earth Sciences*, *91*, 524–537. https://doi.org/10.1007/s005310100228

64 van Leeuwen, T. M., & Muhardjo. (2005). Stratigraphy and tectonic setting of the Cretaceous and Paleogene volcanic-sedimentary successions in northwest Sulawesi, Indonesia: Implications for the Cenozoic evolution of Western and Northern Sulawesi. *Journal of Asian Earth Sciences*, *25*(3), 481–511. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.05.004

65 Ivana, J., Larasati, T., Chandra, V. R., Ari Wibowo, A. E., Darmawan, D., Fadhillah, F. R., Permadi, G. B., Shalihin, M. G. J., Mustika, A. I., & Baxter, C. (2024). 3D model of Bora Pulu non-volcanic geothermal prospect, Central Sulawesi, Indonesia. In *Proceedings, 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2024/Ivana.pdf

66 Idral, A. (2010). Potency of non volcanic hosted geothermal resources in Sulawesi-Indonesia. In *Proceedings World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia. https://worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0602.pdf

67 Pinning, F., Haryanto, A. D., & Hutabarat, J. (2023). Hydrogeochemistry and isotope characteristics of the hot springs in the Wapsalit Area, Buru Regency, Maluku Province, Indonesia. *Journal of Geoscience Engineering, Environment, and Technology*, *8*(4), 269–274. https://doi.org/10.25299/jgeet.2023.8.4.13788

68 Barber, A. J., & Crow, M. J. (2005). Chapter 13 structure and structural history. *Geological Society, London, Memoirs*, *31*, 175–233. https://doi.org/10.1144/gsl.mem.2005.031.01.13

69 Barber, A., J., & Crow, M. J. (2009). Structure of Sumatra and its implications for the tectonic assembly of Southeast Asia and the destruction of Paleotethys. *Island Arc*, *18*(1), 3–20. https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2008.00631.x

70 Guo, T. R., Tong, L. T., & Huang, Y. T. (2018). Metamorphic geothermal reservoir characterisation—a case study in the Jinlun geothermal area, Taitung, Taiwan. *Geothermics*, *74*, 35–44. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.02.002

71 Song, S.-R., & Lu, Y.-C. (2018). Geothermal explorations on the slate formation of Taiwan. In B. I. Ismail (Ed.), *Renewable geothermal energy explorations*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.81157

72 Hartline, C., Walters, M., Wright, M., Rawal, C., Garcia, J., & Farison, J. (2019). *Final report: The Northwest Geysers Enhanced Geothermal System Demonstration Project, The Geysers, California*. U.S. Department of Energy, Office of Science and Technical Information. https://doi.org/10.2172/1523288

73 Idrus, A., Fadlin, Prihatmoko, S., Wayan Warmada, I., Nur, I., & Michael Meyer, F. (2012). The metamorphic rock-hosted gold mineralization at Bombana, Southeast Sulawesi: A new exploration target in Indonesia. *Jurnal Sumber Daya Geologi*, *22*(1), 35–48. https://jgsm.geologi.esdm.go.id/index.php/jgsm/article/view/105

74 White, P., Ussher, G., & Hermoso, D. (2010). Evolution of the Ladolam geothermal system on Lihir Island, Papua New Guinea. In *Proceedings World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia. https://worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/ WGC/2010/1226.pdf

BAB 3, BAGIAN 2 REFERENSI

1 Project InnerSpace. (2025). GeoMap. https://geomap.projectinnerspace.org/map-selection/

2 International Energy Agency (IEA). (2024). *Southeast Asia energy outlook 2024*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/ac357b64-0020-421c-98d7-f5c468dadb0f/SoutheastAsiaEnergyOutlook2024.pdf. See p. 80.

3 Pocasangre, C., & Fujimitsu, Y. (2018). A Python-based stochastic library for assessing geothermal power potential using the volumetric method in a liquid-dominated reservoir. *Geothermics*, 76, 164–176. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.07.009

4 International Energy Agency (IEA). (2024). *The future of geothermal energy*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/b5b73936-ee21-4e38-843b-8ba7430fbe92/TheFutureofGeothermal.pdf Augustine, C. (2016). *Update to enhanced geothermal system resource potential estimate*. National Renewable Energy Laboratory. https://www.osti.gov/biblio/1330935

5 Project InnerSpace. (n.d.). *Subsurface WOA*. https://storage.googleapis.com/project-innerspace-tile-output-prod/Subsurface_WOA_I.pdf

6 Project InnerSpace. (n.d.). *Subsurface WOA*. https://storage.googleapis.com/project-innerspace-tile-output-prod/Subsurface_WOA_I.pdf

7 Project InnerSpace. (2025). *GeoMap*. https://geomap.projectinnerspace.org/map-selection/





Bab 4

Melampaui Listik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung di Indonesia

Adi Susilo, Universitas Brawijaya
Daniel W. Adityatama, M. Rizqi Al Asy'ari, dan Vincentius A. Brilian, Geoenergis

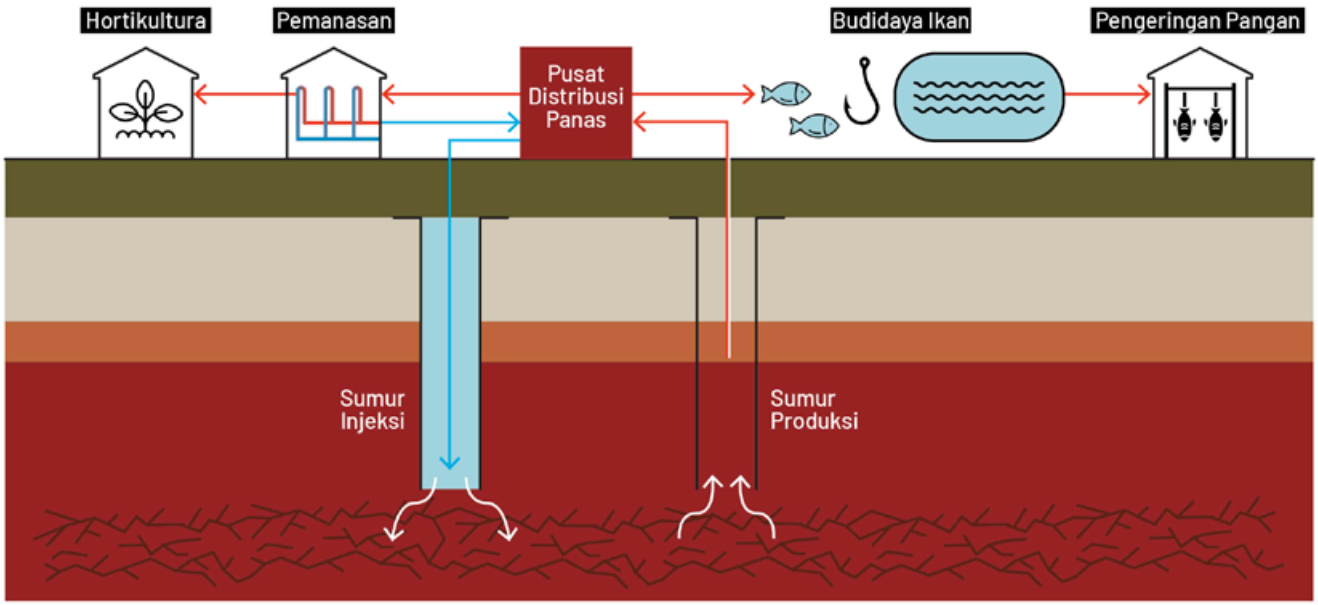
Pada 2023, total permintaan termal Indonesia mendekati 3 juta terajoule. Saat ini lebih dari 66% dari total permintaan tersebut dapat digantikan oleh panas bumi yang bersih, stabil, dan aman dengan harga yang kompetitif. Seiring semakin banyaknya proyek yang dibangun dan penurunan biaya hingga 90%, permintaan termal Indonesia dapat digantikan oleh energi panas bumi pemanfaatan langsung (direct-use). Hal ini dapat berkontribusi besar dalam membantu Indonesia mencapai target iklim 2030 dan 2060. Titik awal yang paling menjanjikan adalah proses pendinginan di Jawa dan pemanasan di sektor agribisnis Indonesia.

Indonesia merupakan produsen listrik panas bumi terbesar kedua di dunia.[1] Negara ini juga memiliki peluang besar yang belum dimanfaatkan untuk memperluas pemanfaatan energi bersih. Ini tidak hanya berlaku untuk listrik, tetapi juga untuk pemanfaatan panas langsung. Faktanya, Indonesia termasuk negara yang output pemanfaatan langsung panas buminya jauh di bawah potensi yang dimilikinya. Bab ini menyajikan analisis sektor sektor yang siap bertransisi menuju panas bumi bersih serta jalur untuk menciptakan kondisi yang memungkinkan berkembangnya industri tersebut dalam beberapa tahun ke depan.

Energi panas bumi dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu pemanfaatan tidak langsung dan pemanfaatan langsung. Untuk pemanfaatan tidak langsung yaitu pembangkitan listrik, pengembang memerlukan suhu bawah permukaan umumnya di atas 150 derajat Celsius. Untuk sistem pemanfaatan langsung yang menjadi fokus bab ini, suhu antara 20 derajat Celsius hingga 150



PEMANTAATAN SUMBER DAYA PANAS BUMI



Gambar 4.1: Ilustrasi pemanfaatan sumber daya panas bumi yang menunjukkan perbedaan antara pemanfaatan tidak langsung untuk pembangkitan listrik dan pemanfaatan langsung panas bumi. Sumber Diadaptasi dari Al Asy'ari, M. R., Adityatama, D. W., Brilian, V. A., Erichatama, N., & Purba, D. (2024). *Beyond electricity: Geothermal direct use business models and potential applications in Indonesia*. In *Proceedings of the 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States; Energy Sector Management Assistance Program. (2022). *Direct utilization of geothermal resources*. World Bank; U.S. Department of Energy. (2019). *GeoVision: Harnessing the heat beneath our feet*.

derajat Celsius dapat digunakan untuk proses district cooling di industri akuakultur dan aplikasi pertanian (lihat **Gambar 4.1** and **4.2**) [2,3,4,5] Sistem apa pun yang menggunakan sumber daya panas bumi berupa fluida atau panas dari dalam tanah tanpa mengubahnya terlebih dahulu menjadi listrik termasuk pemanfaatan langsung panas bumi. Sistem pemanfaatan langsung ini dapat menggantikan pembakaran bahan bakar fosil untuk pemanasan industri seperti pengolahan makanan tekstil dan kimia. Pergeseran ini akan mendukung sektor industri yang lebih berkelanjutan dan meningkatkan efisiensi energi di bangunan komersial dan residensial.

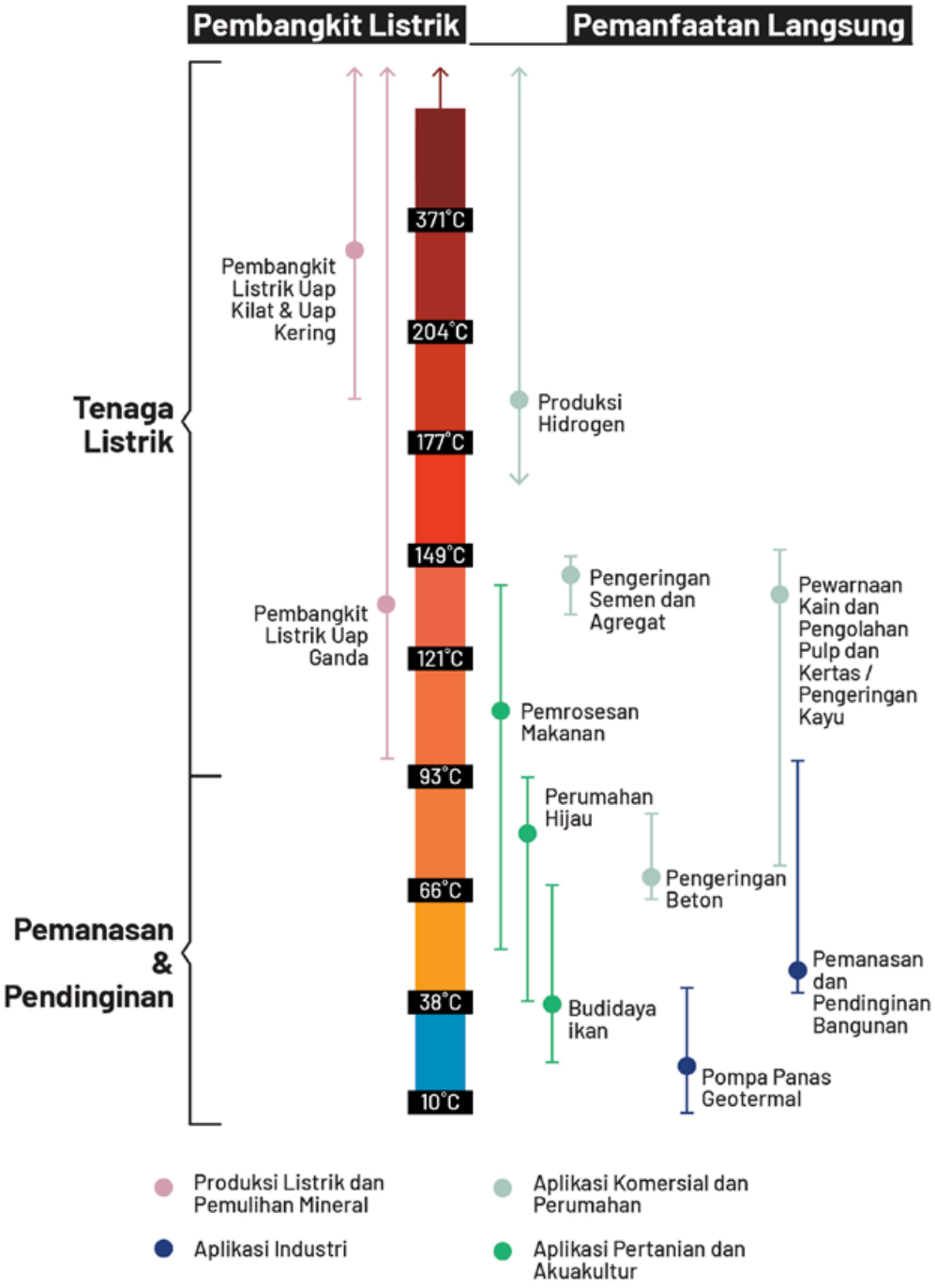
Analisis terbaru mengenai suhu pada berbagai kedalaman di Indonesia (**Gambar 4.24**, **4.25**, dan **4.26**) mengonfirmasi bahwa terdapat banyak wilayah di Indonesia yang memiliki panas bawah permukaan yang memadai, yaitu antara 30 derajat Celsius hingga 100 derajat Celsius pada kedalaman dangkal hingga sedang yaitu kurang dari 1.000 meter, sehingga menjadikan Indonesia sangat menarik untuk berbagai aplikasi pemanfaatan langsung dengan biaya yang kompetitif.

Saat ini sebagian besar proyek pemanfaatan langsung panas bumi di Indonesia digagas melalui program tanggung jawab sosial perusahaan dan dilaksanakan oleh pengembang sebagai bagian dari kegiatan pemberdayaan masyarakat. Namun, potensi untuk berkembang jauh melampaui inisiatif tersebut sebagaimana dibahas dalam bagian Peluang Terbesar Pendinginan di Jawa dan Pemanasan Proses di Agribisnis terutama seiring meningkatnya kesadaran tentang efisiensi energi dan keberlanjutan panas bumi.[6]

PEMANFAATAN LANGSUNG PANAS BUMI DI SELURUH DUNIA

Di seluruh dunia pemanfaatan langsung panas bumi paling banyak digunakan untuk pemanasan, terutama di wilayah beriklim dingin seperti Islandia, Swedia, dan Swiss. Negara-negara seperti Tiongkok, Amerika Serikat, Turki, dan Jepang memperluas pemanfaatan langsung untuk rumah tangga industri pemandian umum dan pertanian seperti pemanasan rumah kaca.[7]

APLIKASI PANAS BUMI DAN KEBUTUHAN TEMPERATUR



Gambar 4.2: Diagram Lindal ini menunjukkan berbagai aplikasi potensial berdasarkan variasi rentang suhu. Sumber: Diadaptasi dari Porse, S. (2021). *Geothermal energy overview and opportunities for collaboration*. Energy Exchange.

Pada 2023, kapasitas terpasang global untuk pemanfaatan langsung panas bumi mencapai sekitar 126.000 megawatt panas dengan konsumsi tahunan sebesar 1,28 juta terajoule di lebih dari 88 negara.[8] Karena merupakan teknologi yang telah matang dengan pemasangan proyek selama beberapa dekade, pompa kalor sumber panas bumi atau *ground source heat pumps* yang menggunakan suhu panas bumi dangkal antara 5 derajat Celsius hingga 30 derajat Celsius untuk pemanasan dan pendinginan menyumbang 72% dari kapasitas terpasang tersebut.[9,10]

Berbagai proyeksi menunjukkan akan terjadi peningkatan signifikan secara internasional yaitu bertambah sekitar

470.000 terajoule dalam pemanfaatan teknologi pemanfaatan langsung tidak termasuk GSHP pada 2030 (lihat **Gambar 4.3**). Angka ini setara dengan peningkatan sebesar 212%.[11]

DUKUNGAN DARI BANK DUNIA

Pemerintah El Salvador telah memulai proyek pemanfaatan langsung panas bumi dengan dukungan pendanaan dari Bank Dunia. Lembaga tersebut menjanjikan US$150 juta untuk mendukung proyek pengeboran panas bumi yang dipimpin pemerintah bagi pembangkitan listrik dan pemanfaatan langsung seperti agribisnis lokal sebagai bagian dari transisi energi berkelanjutan negara tersebut.[12,13] Komitmen ini menegaskan bahwa proyek pemanfaatan langsung panas bumi tidak hanya dapat meningkatkan sistem energi dan pangan tetapi juga menarik investasi.

ARAH KE DEPAN: USULAN DAN TANTANGANNYA

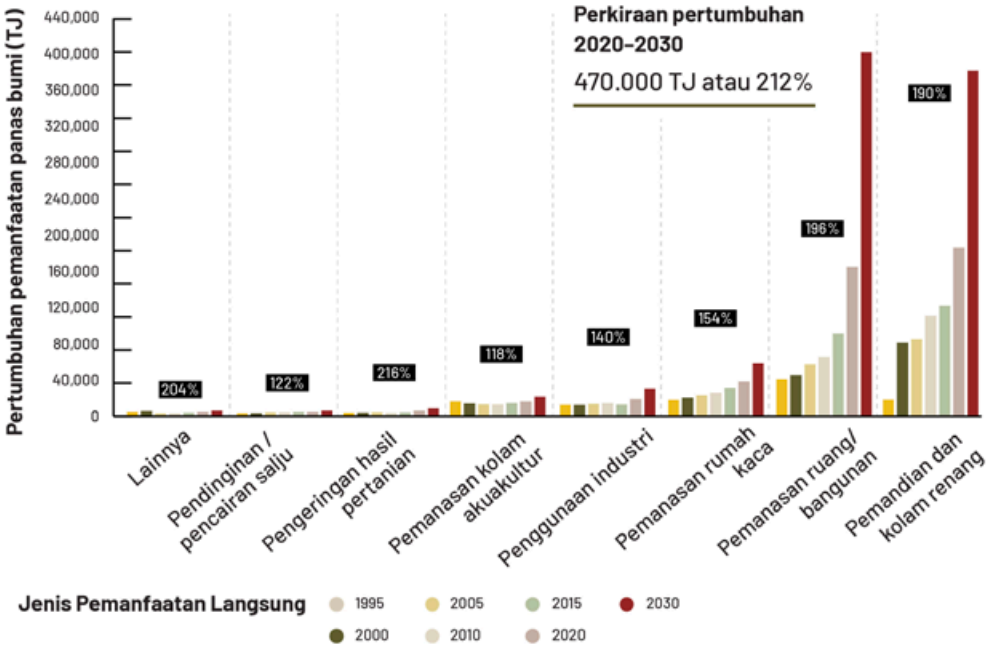
Di Indonesia yang beriklim tropis aplikasi paling tepat untuk pemanfaatan langsung panas bumi adalah pada proses industri kegiatan pertanian serta *district cooling* untuk gedung komersial atau residensial skala besar. Sistem GSHP dapat disesuaikan untuk kebutuhan pendinginan dan pemanasan pada bangunan komersial dan residensial.

Meskipun pemanfaatan langsung panas bumi memiliki sejarah panjang komersialisasi, di berbagai negara sumber daya ini menghadapi penundaan terutama karena tidak adanya regulasi di beberapa lokasi.

Di Indonesia, iklim usaha untuk pemanfaatan langsung panas bumi diperkirakan akan meningkat. Indonesia saat ini berada pada peringkat 74 di dunia dalam pemanfaatan langsung panas bumi dan kemajuannya relatif terbatas sejak 2015. Hal ini disebabkan fokus utama Indonesia pada panas bumi untuk pembangkitan listrik serta belum adanya kebijakan yang jelas untuk memungkinkan proyek pemanfaatan langsung.[14] Berbagai pemangku kepentingan termasuk pemerintah, lembaga riset, dan pengembang sedang bekerja untuk memperluas implementasi panas bumi untuk kebutuhan praktis seperti pertanian, pariwisata, dan proses industri.

Hambatan struktural lainnya adalah terbatasnya klasifikasi kegiatan pemanfaatan langsung dalam sistem investasi Indonesia. Platform Online Single Submission mengakui kegiatan pemanfaatan langsung panas bumi di bawah Klasifikasi Baku Lapangan Usaha Indonesia (KBLI) 06202 untuk eksplorasi dan

PROYEKSI PERTUMBUHAN GLOBAL PEMANFAATAN LANGSUNG PANAS BUMI



Gambar 4.3: Proyeksi global pemanfaatan langsung panas bumi tanpa pompa kalor. Sumber Dimodifikasi dari Richter, A. (2023). *Talk #1 - Low enthalpy geothermal: An attempt to positioning* [YouTube video]. SPE Europe Energy GeoHackathon.



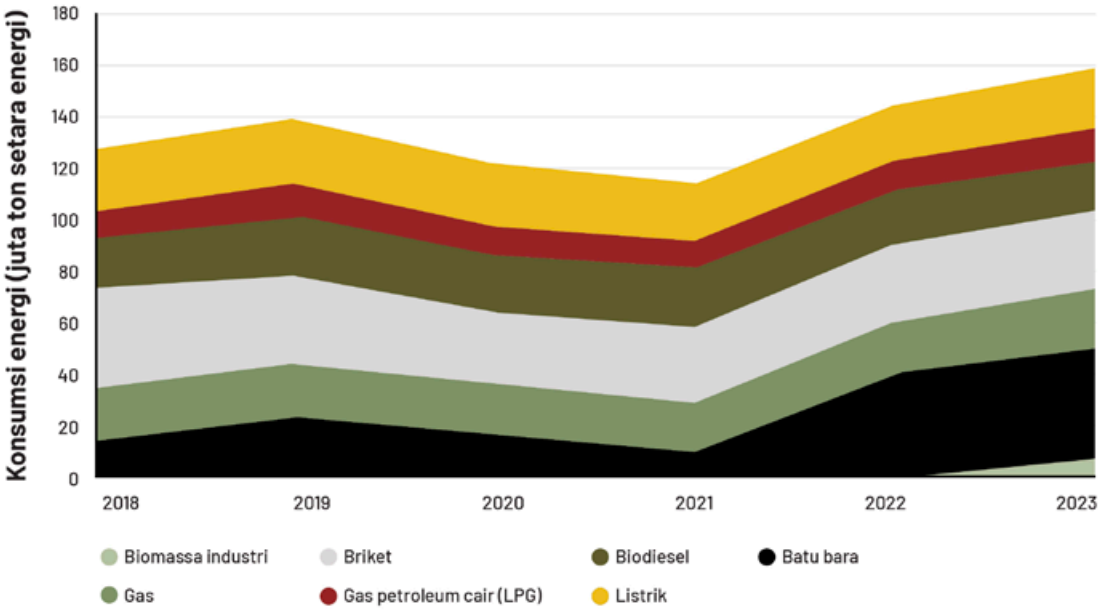
Gambar 4.4: Proyek pemanfaatan langsung panas bumi yang telah beroperasi dan direncanakan beserta status terkini di Indonesia. Sumber: Bagaskara, A., Al Asy'ari, R. M., Adityatama, D. W., Purba, D., Ahmad, A. H., Pratama, A. R., & Mukti, A. W. (2023). Exploring new ideas to promote and Improve geothermal direct use in Indonesia. In *Proceedings of the 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States.

ekstraksi dan KBLI 35111 untuk pembangkitan listrik. Saat ini belum ada kode KBLI khusus untuk aplikasi pemanfaatan langsung panas bumi seperti GSHP sebagaimana dijelaskan dalam lampiran. Tanpa klasifikasi khusus pengembang tidak memiliki jalur yang jelas untuk mendaftarkan dan mengurus izin proyek pemanfaatan langsung sehingga sulit untuk mengakses insentif investasi atau pembiayaan melalui kerangka investasi resmi Indonesia. (Lihat Bab 7, "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia.")

Untuk mendukung perluasan ini, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menerbitkan Peraturan Nomor 5 Tahun 2021 yang menetapkan standar perizinan persyaratan proyek dan kompetensi personel.[15] Sejumlah proyek pemanfaatan langsung panas bumi telah beroperasi dengan inisiatif tambahan yang sedang dikaji dan direncanakan untuk pengembangan masa depan. Pemanfaatan langsung panas bumi di Indonesia masih berada pada tahap awal. Proses ini dipimpin oleh badan usaha milik negara, seperti PT Pertamina Geothermal Energy, dengan partisipasi dari pengembang swasta di bawah pengawasan Kementerian ESDM yang kebijakannya terus mendorong adopsi yang lebih luas. (Untuk membantu pengambil kebijakan dapat bekerja memperdalam pemahaman tentang manfaat dan potensi energi panas bumi. Sebagai inspirasi Indonesia dapat mencontoh Selandia Baru, di sana anak-anak mengunjungi lembaga dan lokasi panas bumi untuk mempelajari energi besar yang berasal dari panas bumi.[16])

Sebagian besar proyek pemanfaatan langsung panas bumi komersial yang beroperasi saat ini berada di sektor pariwisata seperti pemanasan, pemandian air panas,

KONSUMSI ENERGI FINAL BERDASARKAN JENIS



Gambar 4.5: Konsumsi energi di Indonesia berdasarkan berbagai jenis energi antara 2018 dan 2023. Sumber: National Energy Council. (2024). *National energy balance analysis book for 2024*. Government of Indonesia.

dan resor spa. Ada juga beberapa aplikasi di sektor pertanian dan industri melalui inisiatif tanggung jawab sosial perusahaan. Proyek-proyek ini belum berkembang menjadi usaha komersial penuh. Proyek pemanfaatan langsung lainnya masih berada pada tahap perencanaan.

Di Indonesia, studi awal mengenai proyek pemanasan dan pendinginan berbasis panas bumi dengan sistem GSHP telah dilakukan di lokasi seperti Ciater, Lahendong, Jakarta, dan Bali.[17,18] (Lihat **Gambar 4.4** untuk daftar proyek pemanfaatan langsung panas bumi di Indonesia dan statusnya saat ini.) Untuk merealisasikan peluang tersebut beberapa tantangan perlu diatasi. Lihat Bab 7 "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia" untuk informasi lebih lanjut mengenai isu-isu tersebut dan langkah yang diperlukan untuk memajukan industri ini.[19])

KUANTIFIKASI DAN PEMETAAN PERMINTAAN ENERGI TERMAL INDONESIA

Gambaran Umum Permintaan Energi Termal Nasional

Indonesia merupakan salah satu konsumen energi terbesar di dunia dan menempati peringkat ke 10 secara global.[20] Di seluruh sektor sebagian besar energi tersebut masih diproduksi dari bahan bakar berbasis batu bara dan minyak (**Gambar 4.5**). Pada 2023, sektor industri menyumbang porsi konsumsi energi terbesar sebesar 43%, diikuti oleh sektor transportasi sebesar 38%. Sektor residensial dan komersial mengonsumsi energi dalam jumlah lebih kecil, namun tetap signifikan mengingat besarnya populasi Indonesia dan laju urbanisasi yang terus meningkat (**Gambar 4.6**).

Untuk mendukung transisi energi bersih Indonesia, penting untuk melihat permintaan energi termal yang dapat digantikan yaitu porsi dari total kebutuhan panas dan pendinginan yang dapat dipenuhi melalui pemanfaatan langsung panas bumi berdasarkan suhu proses dan ketersediaan teknologi. Informasi ini krusial untuk menentukan prioritas sektor dan lokasi di mana solusi panas bumi dapat diterapkan secara realistis baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

Industri

Di sektor industri, konsumsi energi mencapai 77,9 juta ton setara minyak atau 3.261.517,2 terajoule setara dengan 905.977 terawatt jam. Batu bara sebagai sumber energi terbesar memasok 44,3 juta ton setara minyak atau 1.854.752,4 terajoule setara dengan 515.209 terawatt jam. Energi ini terutama digunakan

pada industri besi dan baja, keramik, semen, serta pulp dan kertas. Industri pupuk dan keramik sebagian besar menggunakan gas untuk menghasilkan panas sementara industri petrokimia umumnya menggunakan produk kilang (lihat **Gambar 4.7**).

elama lima tahun terakhir, konsumsi energi di sektor industri sebagian besar mengalami peningkatan, dengan laju pertumbuhan rata rata sekitar 9% per tahun.[21]

Tahun 2023 mencatat lonjakan signifikan pada konsumsi energi biomassa, yaitu melampaui tingkat tahun 2022 hingga 3,5 kali lipat. Konsumsi batu bara juga tumbuh sekitar 26%, seiring dengan perkembangan industri pengolahan mineral. [22]

Diperkirakan permintaan listrik di sektor industri akan terus bertumbuh pada laju rata rata 2,1% setiap tahun.[23]

Residensial

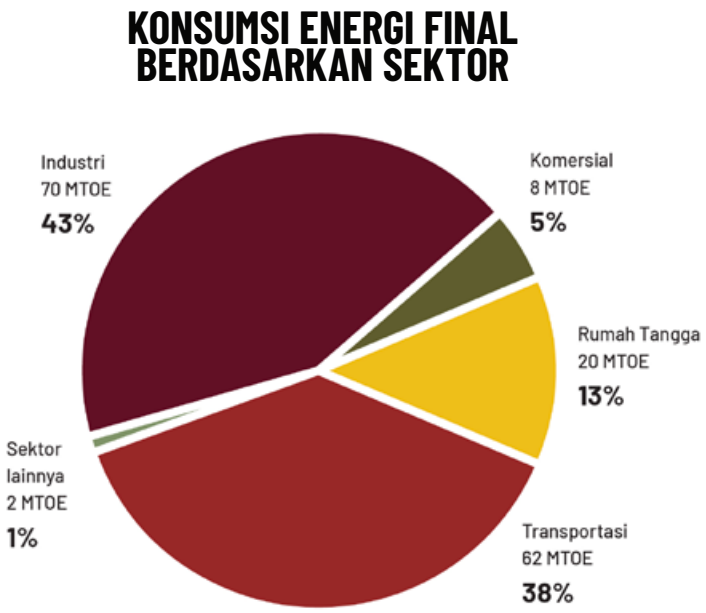
Konsumsi energi di sektor rumah tangga Indonesia pada tahun 2023 (di luar biomassa tradisional) mencapai 21,1 MTOE atau setara 883.440 terajoule (245,4 TWh; lihat **Gambar 4.8**). Setengah dari total konsumsi ini dialokasikan untuk listrik (sekitar 10,5 MTOE), sementara gas minyak bumi cair (LPG) menyumbang 47%.

Sebagian besar kebutuhan listrik rumah tangga digunakan untuk penerangan, pendingin ruangan, pemanas air, mencuci, dan beragam peralatan lainnya (**Gambar 4.9**).[24] Memasak tetap menjadi kegiatan di rumah yang memerlukan energi terbesar, dengan LPG sebagai bahan bakar utama yang paling banyak digunakan (walaupun minyak tanah masih dipakai di beberapa wilayah terpencil).[25]

Penggunaan energi rumah tangga meningkat sekitar 3,8% per tahun dari tahun 2018 hingga 2023. Tren ini dipercepat oleh pandemi COVID 19, saat lebih banyak orang bekerja dari rumah. Ke depan, proyeksi menunjukkan permintaan listrik rumah tangga akan tumbuh pada laju rata rata 2,4% per tahun antara tahun 2030 dan 2060.[26]

Komersial

Seperti ditunjukkan dalam **Gambar 4.9**, konsumsi energi sektor komersial pada tahun 2023, meliputi



Gambar 4.6: Konsumsi energi Indonesia berdasarkan sektor penggunaan akhir pada 2023. MTOE = juta ton setara minyak. Sumber: National Energy Council. (2024). *National energy balance analysis book for 2024*. Government of Indonesia.

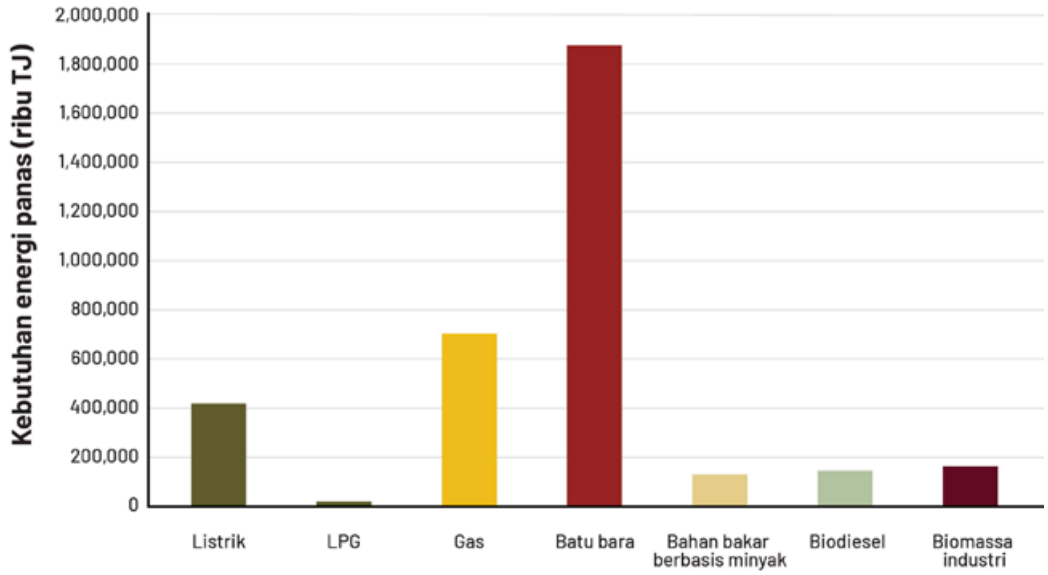
hotel, perkantoran, pusat perbelanjaan, dan fasilitas sejenis, mencapai 7,6 MTOE atau 318.196,8 terajoule. Listrik mendominasi konsumsi tersebut, yaitu sebesar 87%. Permintaan listrik diperkirakan akan terus meningkat pada laju estimasi 2% per tahun.[27]

Berdasarkan data penggunaan energi sektor komersial tahun 2020, sistem pendingin ruangan menyumbang porsi terbesar dari konsumsi listrik.[28] Pendingin ruangan sangat penting untuk menjaga kenyamanan di dalam ruangan mengingat lingkungan tropis di Indonesia (lihat **Gambar 4.10**).[29] Penggunaan listrik penting lainnya meliputi penerangan, pasokan air, dan keperluan operasional gedung.

Berapa Banyak Permintaan Termal yang Dapat Digantikan?

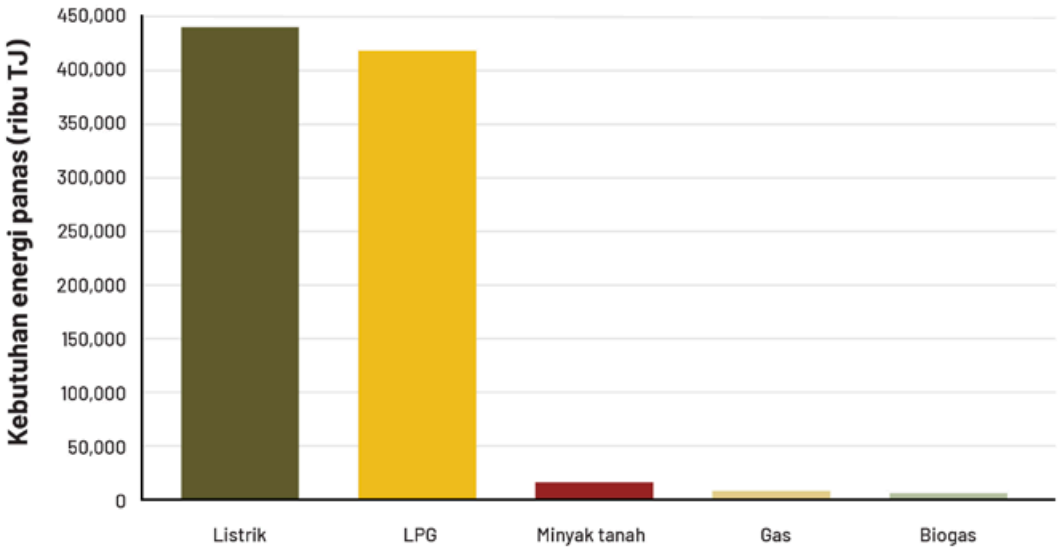
Yang terpenting, aplikasi termal yang menggunakan suhu proses hingga 200°C diklasifikasikan sebagai permintaan termal yang dapat digantikan (lihat **Gambar 4.13**). Ambang batas ini didasarkan pada keluaran pompa kalor industri komersial saat ini (50°C–150°C) dan diproyeksikan mencapai 200°C seiring dengan kemajuan teknologi panas bumi.[30]

KONSUMSI ENERGI PADA SEKTOR INDUSTRI



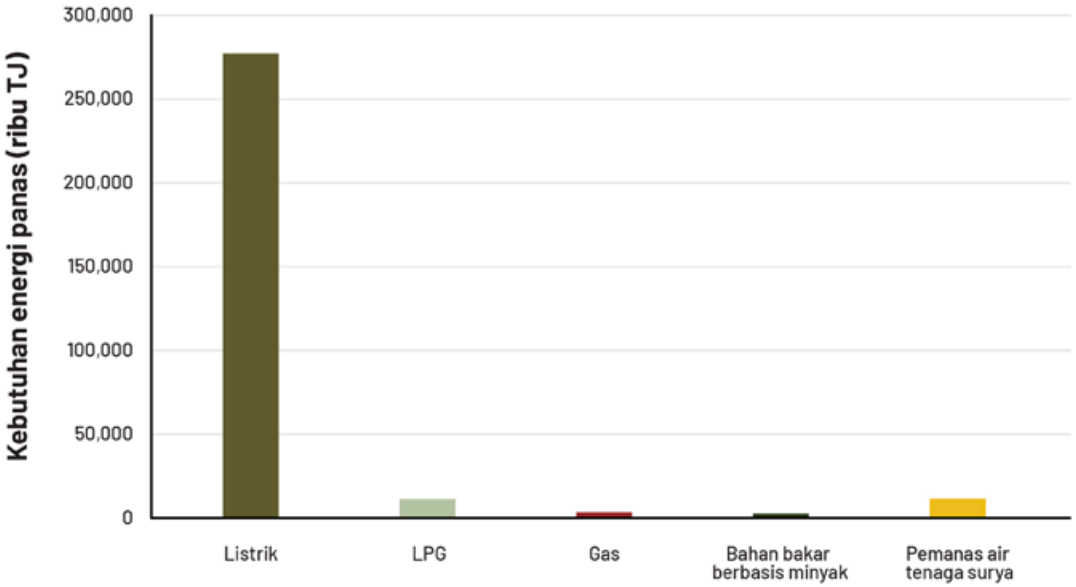
Gambar 4.7: Konsumsi energi berdasarkan jenis bahan bakar di sektor industri tahun 2023. LPG = gas minyak bumi cair; TWh = terawatt jam. Sumber: Diolah dari Ministry of Energy and Mineral Resources. (2023). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2023*. Government of Indonesia.

KONSUMSI ENERGI PADA SEKTOR RESIDENSIAL



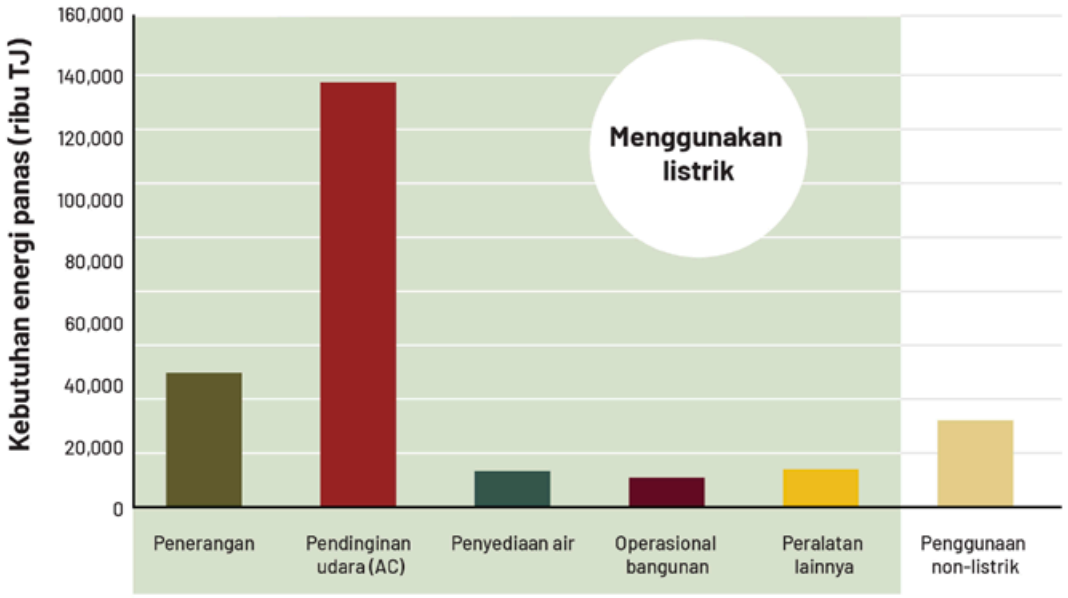
Gambar 4.8: Konsumsi energi berdasarkan jenis bahan bakar di sektor rumah tangga tahun 2023. LPG = gas minyak bumi cair; Gas = gas alam (LPG adalah bahan bakar cair bertekanan yang sebagian besar terbuat dari propana dan butana, dihasilkan sebagai produk sampingan dari penyulingan minyak mentah atau pemrosesan gas alam, dan umumnya didistribusikan dalam tabung. Gas alam sebagian besar adalah metana, bersumber langsung dari reservoir gas bawah tanah dan disalurkan terutama melalui pipa atau sebagai LNG). Sumber: Diolah dari Ministry of Energy and Mineral Resources. (2023). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2023*. Government of Indonesia.

KONSUMSI ENERGI PADA SEKTOR KOMERSIAL



Gambar 4.9: Konsumsi energi berdasarkan jenis bahan bakar di sektor komersial tahun 2023. LPG = gas minyak bumi cair; TJ = terajoule. Sumber: Diolah dari: Ministry of Energy and Mineral Resources. (2023). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2023*. Government of Indonesia.

RINCIAN PENGGUNAAN ENERGI DI SEKTOR KOMERSIAL



Gambar 4.10: Perincian penggunaan energi di sektor komersial tahun 2020. Pemerintah Indonesia belum merilis perincian aplikasi penggunaan energi terbaru untuk sektor rumah tangga dan komersial. Operasional gedung mencakup optimasi transportasi vertikal seperti elevator dan eskalator. TWh = terawatt jam. Sumber: Palladium. (2023). *Commercial sector NZE calculator 2023*. Mentari.

PROYEK POMPA PANAS BUMI SKALA KOMERSIAL DI SWISS

Indonesia memiliki peluang besar untuk memanfaatkan energi panas bumi untuk pendinginan perkotaan, sesuatu yang sudah dilakukan kota-kota di seluruh dunia dalam skala besar. Di seluruh Eropa, sistem panas bumi memanaskan dan mendinginkan seluruh distrik serta bangunan individual, membuktikan bahwa teknologi ini matang dan praktis untuk digunakan di lingkungan perkotaan padat. Di Lausanne, Swiss, misalnya, sekitar 150 lubang bor, yang masing masing sedalam sekitar 300 meter dan dilengkapi dengan probe penukar panas double U, kini memasok kebutuhan pemanasan dan pendinginan penuh lokasi tersebut. Pengeboran perkotaan hanya membutuhkan jejak permukaan yang kecil, dan setelah dipasang, sistem panas bumi memberikan energi termal rendah karbon yang aman selama masa pakai.



Gambar 4.11: Tim layanan sumur sedang bersiap mengebor serangkaian lubang bor panas bumi dangkal untuk menyediakan pemanasan dan pendinginan skala komersial di wilayah perkotaan Lausanne, Swiss. Foto milik Groupe Grisoni.

Saat ini, kebutuhan energi termal di Indonesia berkisar dari suhu yang relatif rendah (70°C–100°C) untuk aplikasi seperti pengeringan hasil pertanian hingga suhu yang sangat tinggi (1,000°C–1,500°C) untuk pemrosesan logam (**Gambar 4.12**). Seperti disebutkan sebelumnya, total permintaan termal Indonesia pada tahun 2023 adalah 2.998.058,6 terajoule.[31] Angka itu diproyeksikan tumbuh pada laju tahunan rata rata 5,1%, mencapai 7.142.641,3 terajoule pada tahun 2050. Jadi, berapa banyak dari permintaan itu yang dapat digantikan dari tahun ke tahun?

- Pada tahun 2023: Porsi yang dapat digantikan adalah 1.994.144,3 terajoule, dengan laju pertumbuhan tahunan rata rata yang diharapkan sebesar 8,2%,
- Pada tahun 2050: Angka itu dapat mencapai 6.415.222,5 terajoule.

Dengan kata lain, 66,5% dari total permintaan termal pada tahun 2023, dan 89,8% pada tahun 2050, dianggap memiliki potensi untuk digantikan oleh pemanfaatan langsung panas bumi.

Untuk menempatkan angka angka ini dalam perspektif, 2.998.058,6 terajoule setara dengan sekitar 241 $MtCO_2e$ atau sekitar seperempat (23%) dari emisi terkait energi Indonesia saat ini, sebuah potensi pengurangan yang sangat besar dan dapat ditindaklanjuti.[32,33] *Kontribusi Nasional yang Ditingkatkan* (NDC) Indonesia tahun 2030 menargetkan pengurangan 365 $MtCO_2e$ di sektor energi

dan industri dibandingkan dengan skenario "bisnis seperti biasa". Mengurangi 66,5% dari permintaan termal saat ini (sekitar 160 $MtCO_2$) akan memenuhi sekitar 44% dari target pengurangan sektor energi 2030 itu sendiri.[34]

Tidak semua permintaan termal dapat digantikan saat ini oleh pemanfaatan langsung panas bumi karena adanya keterbatasan teknologi. Namun, saat ini banyak lokasi di Indonesia memiliki permintaan termal yang dipenuhi dengan bahan bakar fosil dan permintaan itu dapat digantikan, dan di masa depan hal ini akan dapat digantikan lebih lanjut dengan kemajuan teknologi.[35] (Detail mengenai metodologi temuan ini diuraikan pada bagian berikutnya.)

NDC tidak menetapkan kuota khusus energi untuk jalur netral karbon 2060 Indonesia, tetapi dekarbonisasi 90% dari permintaan termal ini (sekitar 217 $MtCO_2$) akan mewakili pemotongan emisi yang signifikan secara nasional. Hal ini menunjukkan bahwa panas bumi untuk mendinginkan dan menyediakan panas untuk industri merupakan faktor penting bagi Indonesia. Yang penting, Indonesia dapat memenuhi hampir setengah dari target 2030 dan sebagian besar sasaran 2060 dengan memanfaatkan keterampilan dan keahlian panas bumi, tetapi mengarahkan penggunaan ini ke sektor lain seperti *district cooling*.

SEKTOR DENGAN KEBUTUHAN ENERGI PANAS TERTINGGI

Data Kebutuhan Energi Panas Indonesia

Industri dan Manufaktur – Proses Pemanasan		Pendinginan dan Penyimpanan Dingin Residensial & Komersial	Pemanasan, Ventilasi, dan Pendinginan Udara (HVAC) Residensial & Komersial
Non-logam	1. Semen 2. Kapur 3. Kaca lembaran (flat glass)	Pendinginan komersial	HVAC Komersial
		Pendinginan rumah tangga	HVAC Residensial
Kimia	1. Amonia 2. Etilena 3. Metanol 4. Polietilena 5. Polipropilena 6. Kalsium karbida 7. Akrilik	Penyimpanan dingin makanan dan minuman	
Pulp dan Kertas	1. Pembuatan kertas mekanis (serat daur ulang) 2. Pembuatan kertas kimia (kraft)		
Logam Dasar	1. Baja – tanur tinggi (blast furnace) 2. Baja – tanur busur listrik (electric arc furnace) 3. Tembaga 4. Aluminum 5. Seng		
Tekstil	1. Pencelupan, pencetakan, dan penyempurnaan		
Produk Minyak dan Batu Bara	1. Pengilangan minyak 2. Karbon hitam		
Pertanian dan Produk Susu	1. Produk susu 2. Gula 3. Tembakau 4. The 5. Kopi 6. Kayu 7. Gula aren dan gula merah		

Kebutuhan Panas Proses Tahunan (TJ)

Produksi tahunan (ton) × input panas spesifik (TJ/ton)

Kebutuhan Pendinginan & Penyimpanan Dingin Tahunan (TJ)

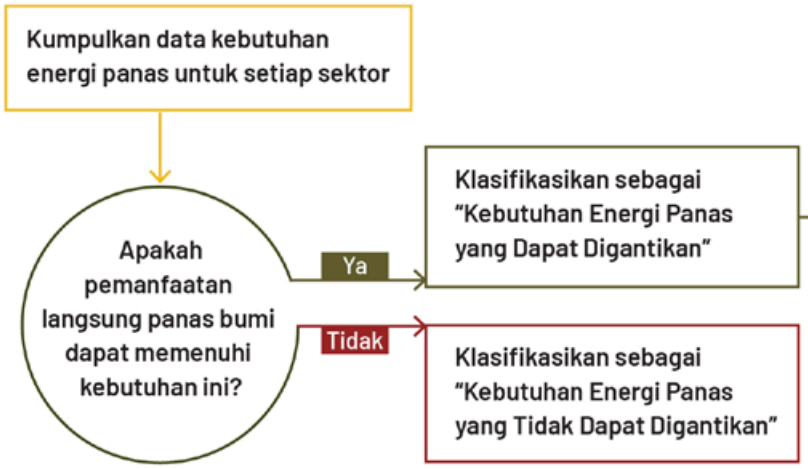
Kapasitas pendinginan per unit (TW) × jumlah unit peralatan × faktor utilisasi (%) × waktu operasi tahunan (jam) × 3.600

Kebutuhan HVAC Rumah Tangga & Komersial Tahunan (TJ)

Kapasitas pendinginan per unit (TW) × jumlah unit peralatan × faktor utilisasi (%) × waktu operasi tahunan (jam) × 3.600

Gambar 4.12: Sektor penggunaan akhir dan aplikasi termal yang dipertimbangkan dari pengumpulan data termal nasional. Daftar sumber lengkap dapat ditemukan di akhir bab ini.

KEBUTUHAN ENERGI PANAS YANG DAPAT DIGANTIKAN



*Kebutuhan dianggap dapat digantikan apabila temperatur proses tidak melebihi 200°C, dengan mempertimbangkan kemajuan teknologi penukar panas dan pompa panas di masa depan.

Gambar 4.13: Klasifikasi sederhana permintaan energi termal yang dapat digantikan. Untuk keperluan penyaringan awal tingkat tinggi ini kemampuan untuk digantikan ditentukan berdasarkan potensi teknis yang dilihat dari suhu semata. Tahapan analisis selanjutnya akan memasukkan faktor ekonomi dan geografis. Sumber Para penulis.

Permintaan yang Dapat Digantikan dalam Proses Pemanasan Industri dan Manufaktur

Pada tahun 2023, total permintaan termal untuk pemanasan proses industri dan manufaktur adalah 1.178.979,0 terajoule. Angka ini diproyeksikan tumbuh rata rata 1% setiap tahun.[36,37,38] Porsi permintaan termal yang dapat digantikan adalah 175.064,7 terajoule, atau 14,8% persen. Namun, poin penting yang harus diingat adalah permintaan yang dapat digantikan itu akan tumbuh pada laju 12,8% setiap tahun (**Gambar 4.14**).[39]

Menurut angka terbaru dan perhitungan oleh penulis, hampir 62,4% sektor pemanasan proses Indonesia menggunakan pemanas berbahan bakar yang membakar solar dan gas alam. *Steam boiler* yang membakar gas alam mencapai 35,3%. (Pemanas listrik menyumbang 2,3% sisanya.) Pada tahun 2050, keseimbangan itu diproyeksikan bergeser: penggunaan *steam boiler* akan lebih dari 52%, dan pemanas berbahan bakar sekitar 44%.

Semua angka ini menunjukkan fakta bahwa dalam waktu dekat, sebagian besar permintaan termal Indonesia dapat digantikan oleh panas langsung panas bumi yang bersih dan aman, terutama untuk kebutuhan suhu rendah hingga sedang (pada atau di bawah 200°C).[40]

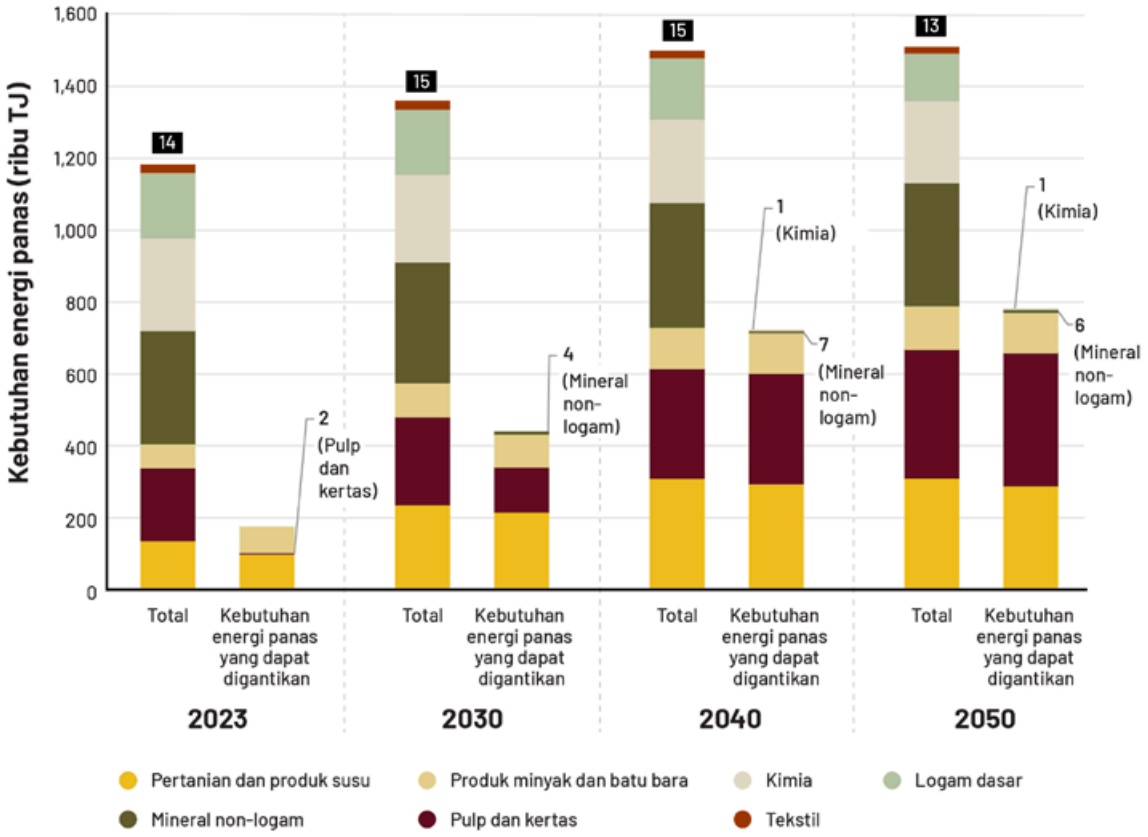
Permintaan yang Dapat Digantikan dan Peningkatan Teknologi yang Akan Datang

Saat ini, di sektor tekstil dan pertanian, lebih dari 70% permintaan termal berada pada atau di bawah 100°C. (Faktanya, dalam manufaktur tekstil, semua kebutuhan panas proses industri berada di bawah suhu ini; lihat **Gambar 4.15**.) Ini berarti semua permintaan dalam industri tekstil saat ini, dan sebagian besar di pertanian, dapat digantikan dengan pemanfaatan langsung panas bumi.

Sebaliknya, dalam produksi mineral non-logam, bahan kimia, dan pulp dan kertas, yang memiliki total permintaan proses pemanasan tertinggi di seluruh sektor, kurang dari 5% permintaan proses pemanasan memerlukan suhu yang lebih rendah. Oleh karena itu, sedikit dari permintaan untuk proses itu yang dapat digantikan.

Industri pulp dan kertas menggunakan suhu pada atau di bawah 200°C untuk proses pemanasannya (**Gambar 4.15**). Menjelang 2050, sebagian besar permintaan ini pada prinsipnya dapat dipenuhi melalui pemanfaatan

TOTAL KEBUTUHAN ENERGI PANAS DAN ANALISIS KETERGANTIAN



Gambar 4.14: Total permintaan pemanasan proses industri dan manufaktur yang diproyeksikan dan dapat digantikan di Indonesia berdasarkan sektor industri, 2023–50. TJ = terajoule. Daftar sumber lengkap dapat ditemukan di akhir bab ini.

langsung panas bumi dengan asumsi adanya peningkatan berkelanjutan dalam kinerja pompa kalor bersuhu tinggi serta kelayakan ekonominya. Hal ini terutama karena seluruh kebutuhan pemanasan proses di sektor industri secara teknis dapat digantikan oleh pemanfaatan langsung panas bumi berdasarkan kemajuan teknologi di masa depan terkait batas suhu pompa kalor. Dengan kata lain, rentang suhu yang dibutuhkan akan dapat dicapai melalui pengembangan pompa kalor industri komersial. (Pernyataan ini tidak mencakup mandat kebijakan maupun pertimbangan ekonomi.)

Istilah "dapat digantikan" di sini merujuk pada permintaan energi termal yang secara teknis dapat digantikan semata mata berdasarkan proyeksi kemajuan teknologi pompa kalor hingga 2050.

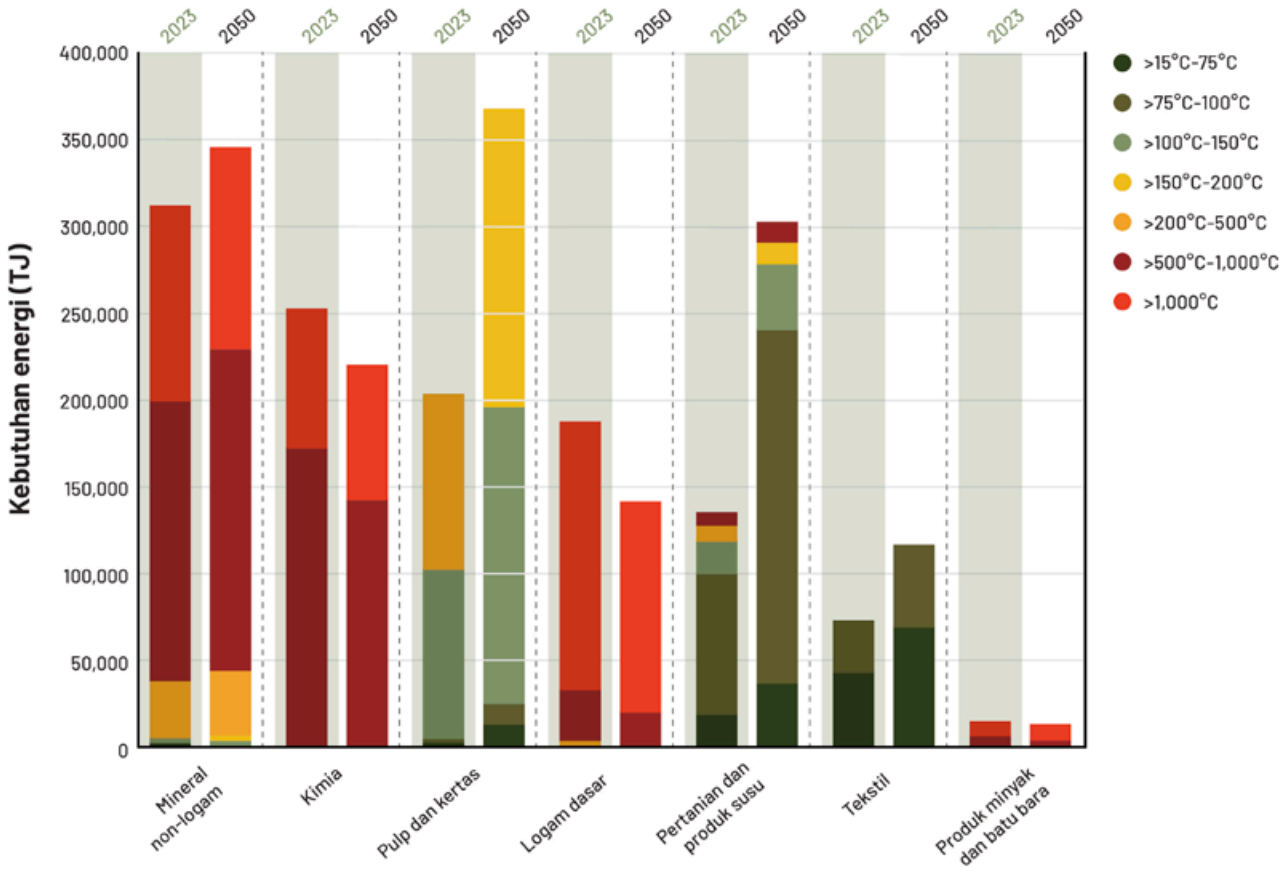
Menariknya, sektor pertanian dan produk susu yang diproyeksikan menempati peringkat ketiga dalam total permintaan energi termal pada 2050 akan memiliki lebih dari 95% kebutuhan energinya pada suhu di bawah atau sama dengan 200°C.[41]

Pendinginan dan Penyimpanan Dingin

Sebagian besar energi yang digunakan di Indonesia dialokasikan untuk pendinginan dan penyimpanan pangan di fasilitas dingin dan permintaan ini diproyeksikan meningkat secara signifikan. Meskipun pemanfaatan langsung panas bumi tidak dapat menggantikan lemari es rumah tangga, teknologi ini dapat menggantikan sistem penyimpanan dingin komersial untuk makanan dan minuman.

Gambaran angkanya sebagai berikut: Pada 2023,

PERBANDINGAN 2023 DAN 2050: KEBUTUHAN ENERGI TERMAL UNTUK PROSES PEMANASAN INDUSTRI DAN MANUFAKTUR



Gambar 4.15: Total permintaan termal pemanasan proses industri dan manufaktur Indonesia berdasarkan suhu pada tahun dasar 2023 dan perkiraan untuk tahun 2050. Daftar sumber lengkap dapat ditemukan di akhir bab ini.

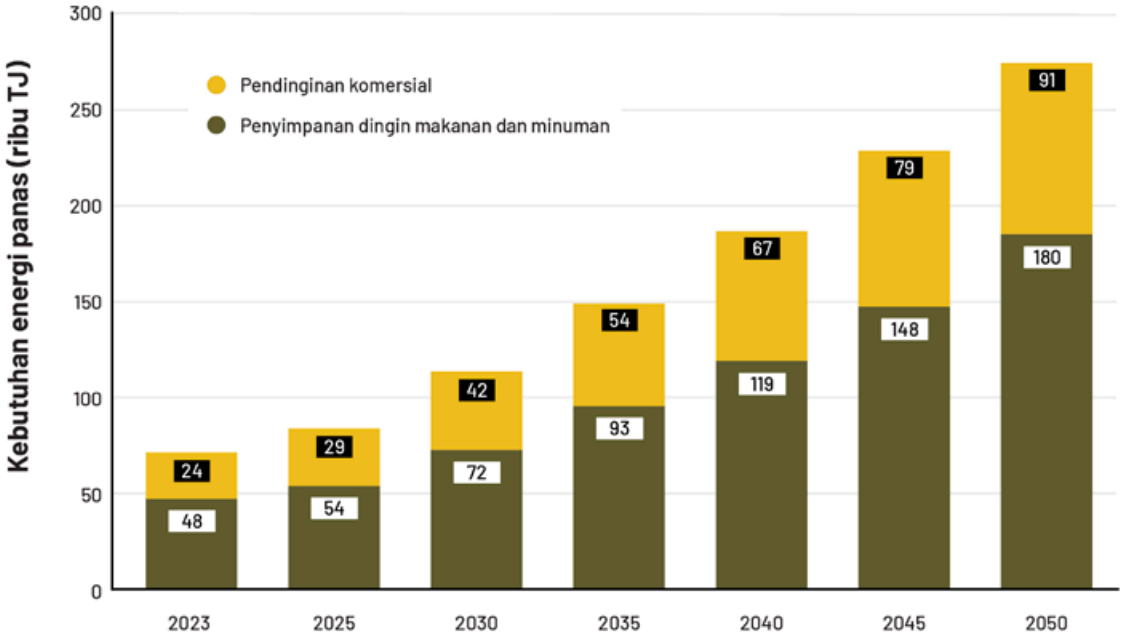
total kebutuhan pendinginan untuk refrigerasi dan penyimpanan dingin di Indonesia mencapai 785,950 terajoules (**Gambar 4.16**), dengan lemari es rumah tangga menyumbang hampir 91% dari total tersebut. Pada 2050, total permintaan diproyeksikan meningkat menjadi 1.002.342 terajoule. Namun yang penting, porsi permintaan dari lemari es rumah tangga akan menurun menjadi 72% seiring meningkatnya permintaan dari lemari es komersial serta penyimpanan dingin makanan dan minuman hingga 18%. Porsi 18% ini menjadi kunci karena seluruhnya dapat digantikan dengan energi panas bumi yang dikonversi menjadi daya pendinginan.

Pada 2023, sebagian besar permintaan energi penyimpanan dingin berasal dari fasilitas penyimpanan untuk mengurangi kehilangan pasca panen sebesar 51% dan fasilitas packhouse siap pasar sebesar 46%. Pada 2050, penyimpanan diproyeksikan berada pada 49% sementara packhouse yang diperkirakan menjadi pengguna pendinginan terbesar akan menyerap 50% permintaan energi termal (**Gambar 4.18**).

Peluang Besar Permintaan Pendinginan yang Dapat Digantikan di Sektor Residensial dan Komersial

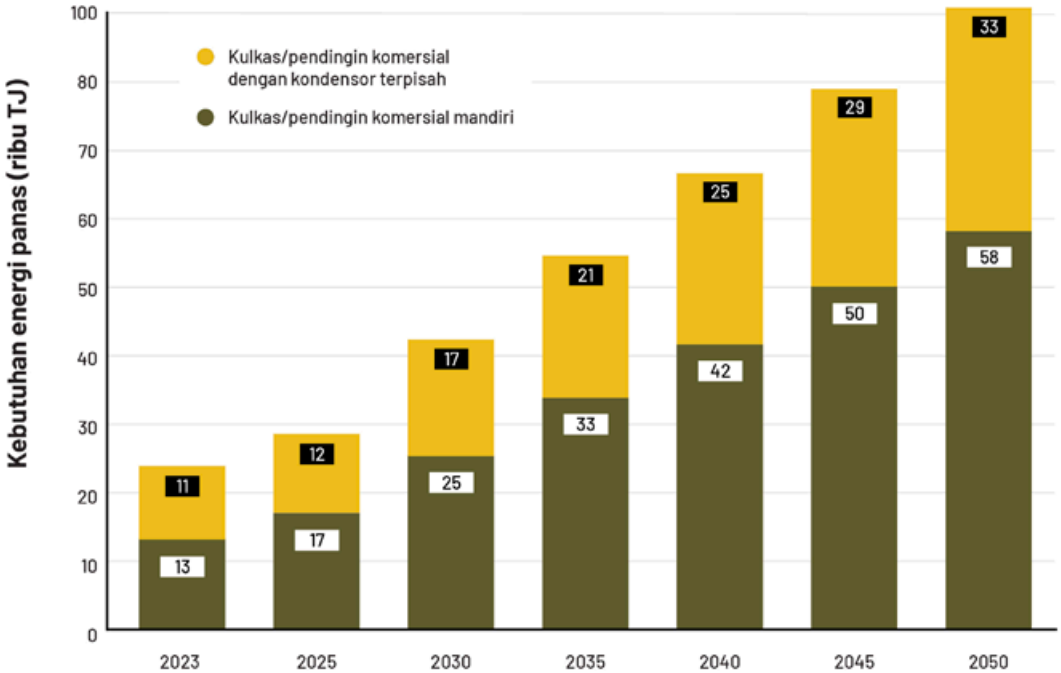
Pada 2023, total permintaan pendinginan untuk sistem pemanas ventilasi dan pendingin udara di sektor residensial dan komersial Indonesia mencapai 1.033.129 terajoule. Pada 2050, angka ini diperkirakan meningkat lebih dari empat kali lipat menjadi 4.633.361 terajoule.

PROYEKSI KEBUTUHAN PENDINGINAN DAN PENYIMPANAN DINGIN



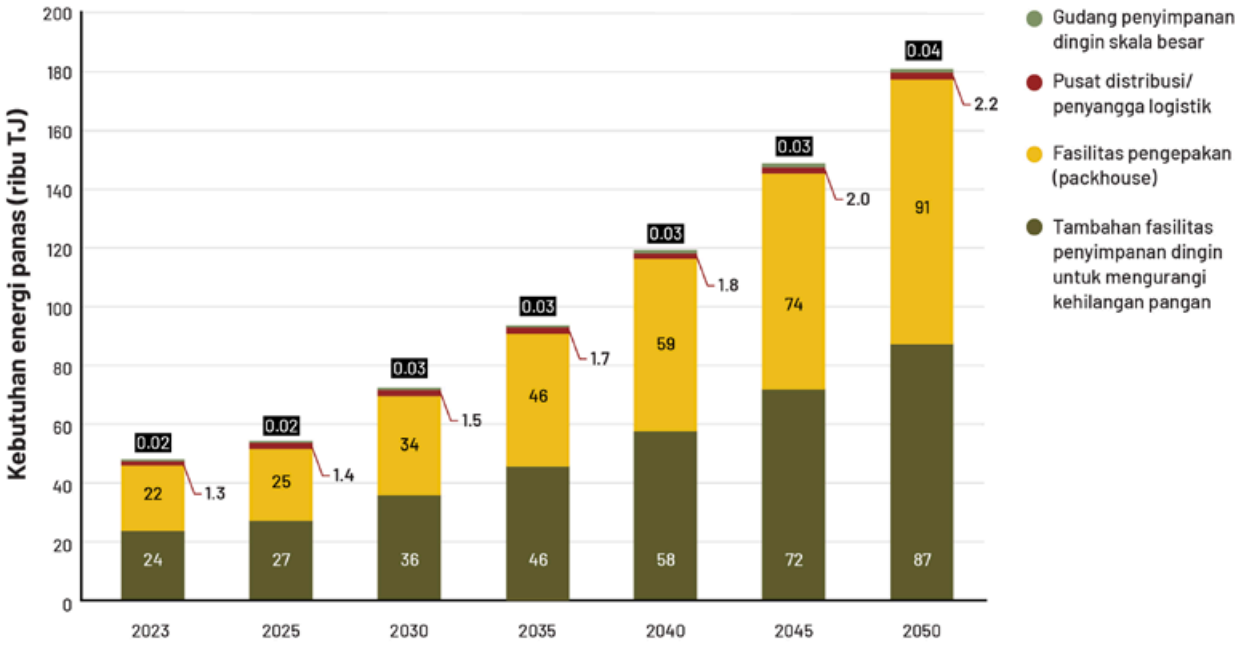
Gambar 4.16: Proyeksi permintaan energi termal penyimpanan dingin dan refrigerasi komersial di Indonesia dari 2023 hingga 2050. Sumber Perhitungan penulis diadaptasi dari Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Indonesia's National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. Government of Indonesia.

PROYEKSI KEBUTUHAN ENERGI PENDINGINAN BERDASARKAN JENIS PERALATAN



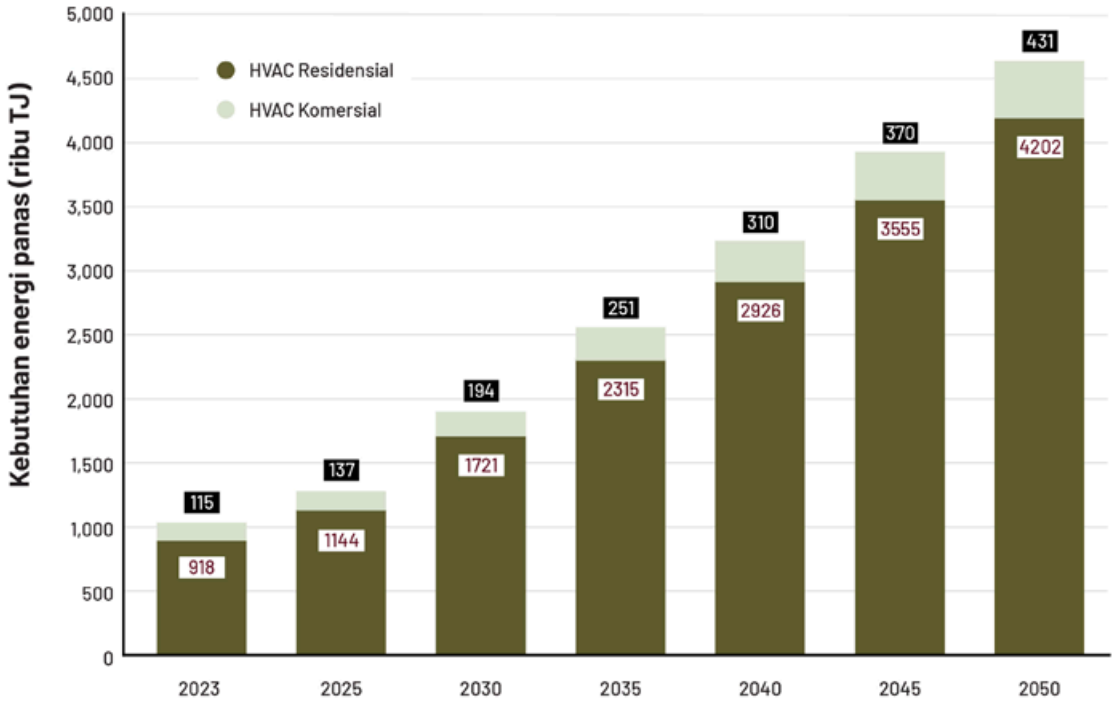
Gambar 4.17: Proyeksi permintaan energi termal refrigerasi komersial di Indonesia berdasarkan jenis peralatan dari 2023 hingga 2050. Sistem kondensasi komersial dan jarak jauh sudah dapat digantikan saat ini. Sumber: Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Indonesia's National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. Government of Indonesia.

PROYEKSI KEBUTUHAN ENERGI TERMAL PENYIMPANAN DINGIN BERDASARKAN JENIS PERALATAN



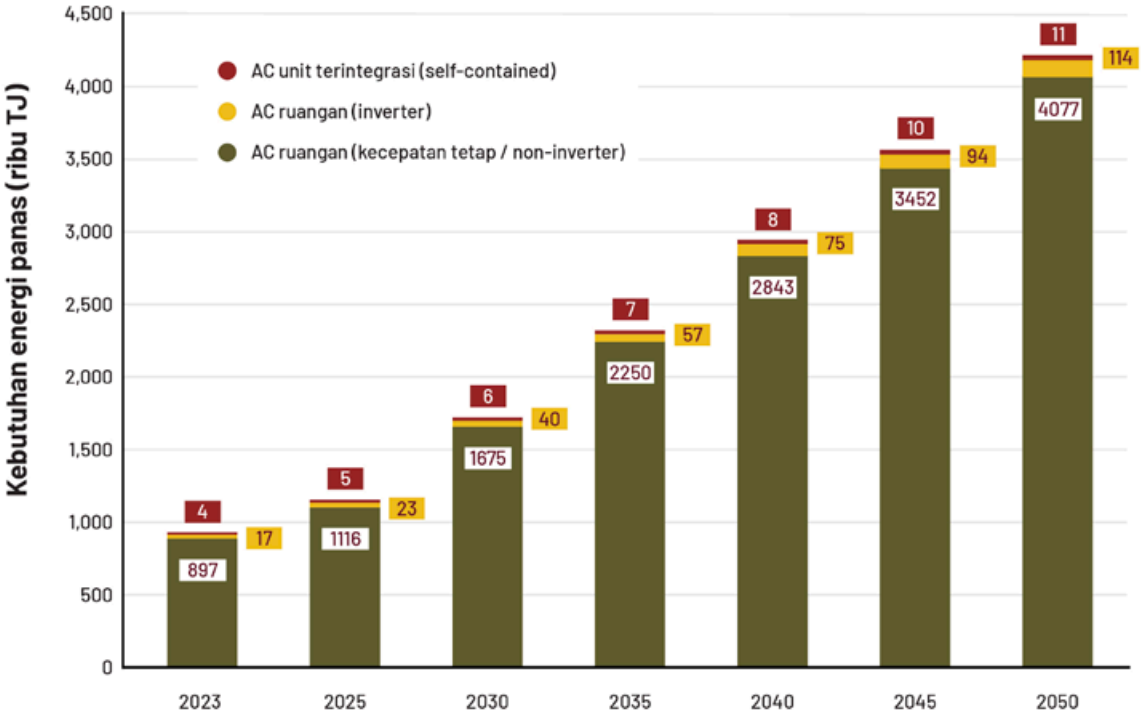
Gambar 4.18: Proyeksi permintaan energi termal penyimpanan dingin di Indonesia berdasarkan jenis peralatan dari 2023 hingga 2050. Seluruh permintaan energi dari packhouse disruption hubs dan bulk cold storage dapat digantikan dengan pemanfaatan langsung panas bumi. Sumber: Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Indonesia's National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. Government of Indonesia.

TOTAL KEBUTUHAN ENERGI PANAS UNTUK HVAC SEKTOR RESIDENSIAL DAN KOMERSIAL, 2023–2050



Gambar 4.19: Proyeksi permintaan energi termal HVAC residensial dan komersial di Indonesia dari 2023 hingga 2050. TJ = terajoule. Sumber: Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Indonesia's National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. Government of Indonesia.

TOTAL KEBUTUHAN ENERGI TERMAL UNTUK HVAC RESIDENSIAL BERDASARKAN JENIS PERALATAN, 2023–2050



Gambar 4.20: Proyeksi permintaan energi termal HVAC residensial di Indonesia berdasarkan jenis peralatan dari 2023 hingga 2050. TJ = terajoule. Sumber: Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Indonesia's National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. Government of Indonesia.

Sebanyak 89% dari total permintaan pada 2023 berasal dari sistem HVAC residensial dan porsi ini diperkirakan terus meningkat (lihat **Gambar 4.19** dan **4.20**).

Pada 2023, di sektor komersial sistem HVAC chiller sentrifugal dan screw chiller merupakan sistem pendinginan utama yang secara bersama menyumbang lebih dari setengah permintaan komersial. Sistem sistem ini diperkirakan tetap dominan pada 2050 dan banyak di antaranya berpotensi digantikan atau didukung oleh pendinginan berbasis panas bumi (**Gambar 4.21**).

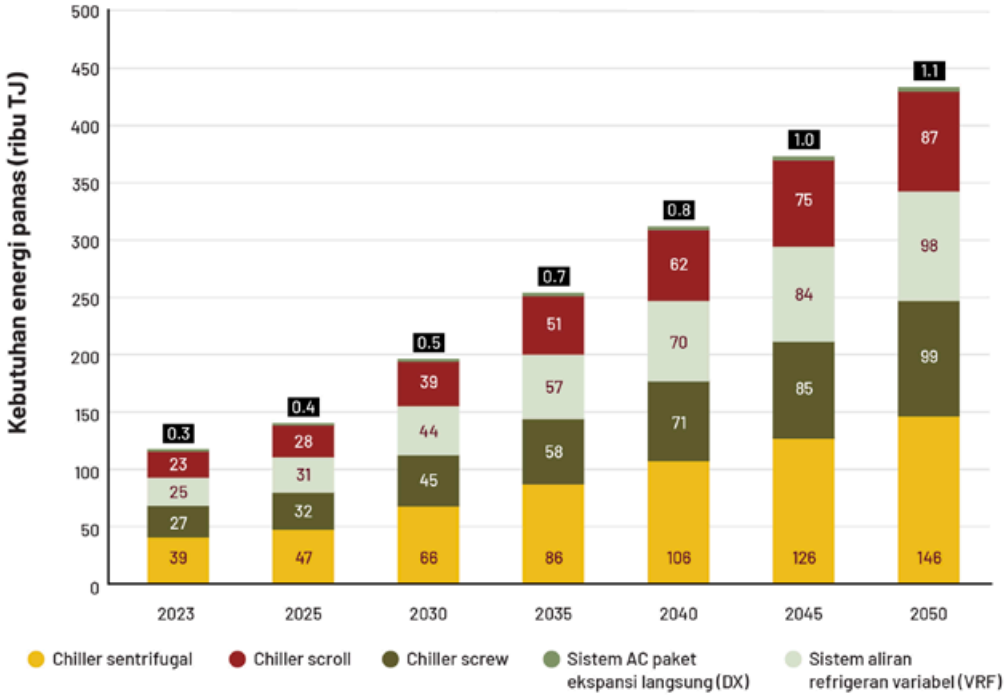
RINGKASAN: APA YANG DAPAT DIGANTIKAN SEKARANG DAN DALAM WAKTU DEKAT

- Total permintaan energi termal Indonesia diproyeksikan meningkat dari **2.998.058,6 terajoule** pada 2023 menjadi **7.142.641,3 terajoule** pada 2050.
- Bagian dari permintaan tersebut yang dapat digantikan oleh panas bumi diperkirakan meningkat dari **1.994.144,3 terajoule** pada 2023 menjadi **6.415.222,5 terajoule** pada 2050.
- Dengan demikian porsi permintaan energi termal yang dapat digantikan meningkat dari **66,5%** pada 2023 menjadi **89,8%** pada 2050.

Bagaimana hal ini dapat terjadi? Proyeksi kemajuan teknologi pompa kalor memungkinkan teknologi tersebut menangani seluruh rentang suhu proses HVAC residensial dan komersial yang lebih tinggi.[42]

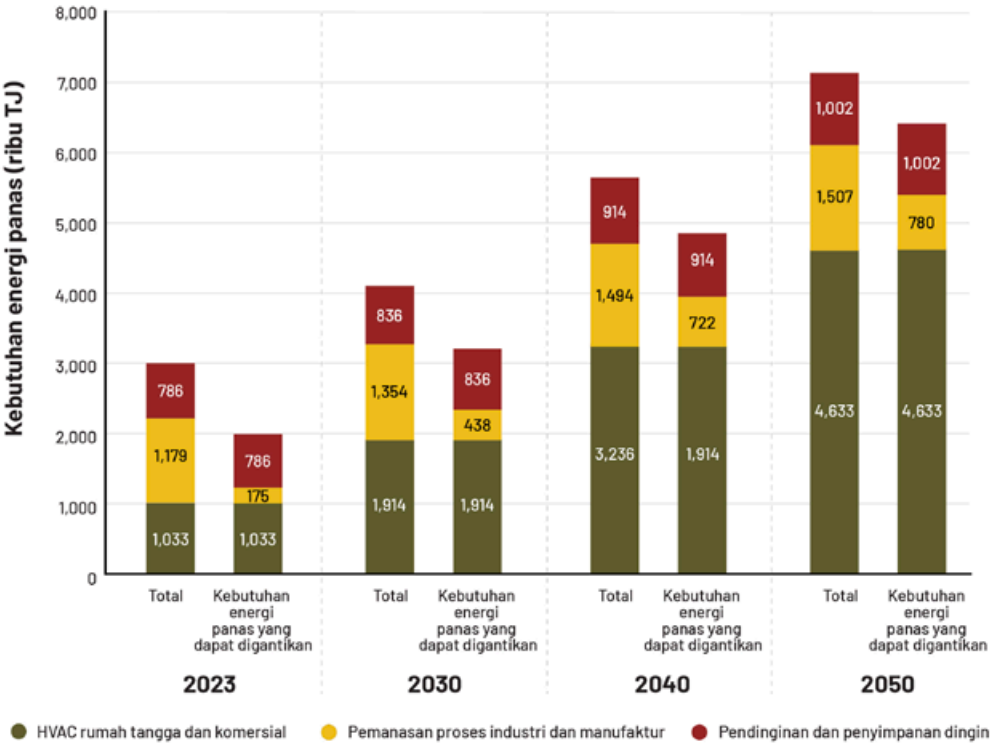
- Pada 2023 sektor industri dan manufaktur merupakan konsumen energi termal terbesar dengan porsi 39,3% dari total.
- Pada 2050, konsumen energi termal terbesar diperkirakan berasal dari sektor HVAC residensial dan komersial dengan porsi 64,9% dari total permintaan (lihat **Gambar 4.22**).

TOTAL KEBUTUHAN ENERGI TERMAL UNTUK HVAC KOMERSIAL BERDASARKAN JENIS PERALATAN, 2023–2050



Gambar 4.21: Proyeksi permintaan energi termal HVAC komersial di Indonesia berdasarkan jenis peralatan dari 2023 hingga 2050. TJ = terajoule. Sumber: Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Indonesia's National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. Government of Indonesia.

PROYEKSI TOTAL DAN KEBUTUHAN ENERGI TERMAL YANG DAPAT DIGANTIKAN BERDASARKAN SEKTOR PENGGUNAAN AKHIR, 2023–2050



Gambar 4.22: Proyeksi total dan permintaan energi termal yang dapat digantikan di Indonesia berdasarkan sektor penggunaan akhir dari 2023 hingga 2050 dengan kata lain 89,9% dari total permintaan energi termal dapat digantikan. TJ = terajoule. Sumber Analisis penulis berdasarkan data permintaan energi termal dari laporan resmi berbagai lembaga literatur akademik serta data Badan Pusat Statistik. Sumber data rinci disajikan dalam Lampiran 1.

- Perubahan ini didorong oleh laju pertumbuhan tahunan sektor HVAC yang sangat tinggi sebesar 12,9% dibandingkan pertumbuhan sektor industri sebesar 1,0%.

- Kabar baiknya seluruh kebutuhan pendinginan di sektor industri serta HVAC residensial dan komersial secara teknis dapat dipenuhi melalui pemanfaatan langsung panas bumi baik melalui sistem pendinginan distrik maupun GSHP individual atau terhubung. Meskipun memerlukan pembangunan sektor secara besar besaran dan dukungan kebijakan pada 2050 sebesar 64,9% dari total permintaan energi termal Indonesia berpotensi dipenuhi oleh panas bumi yang bersih aman dan andal.

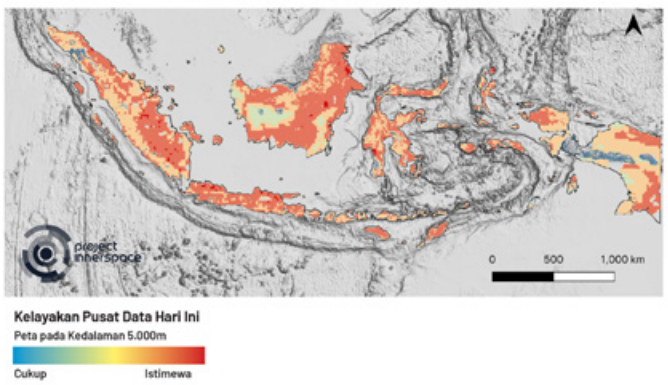
PERMINTAAN ENERGI DAN PENDINGINAN UNTUK PUSAT DATA DI INDONESIA

Meskipun belum menjadi kategori tersendiri dalam statistik resmi, industri pusat data di Indonesia telah berkembang sangat pesat baik dari sisi skala maupun perannya sebagaimana terjadi secara global. Pertumbuhan ini didorong oleh pesatnya ekonomi digital serta kepentingan nasional terkait kedaulatan data. Saat ini Indonesia memiliki pasar pusat data terbesar ketiga di Asia Tenggara setelah Singapura dan Malaysia.[43]

Pusat data merupakan fasilitas dengan konsumsi energi yang sangat tinggi dan sebagian besar energi tersebut digunakan untuk satu fungsi krusial yaitu pendinginan. Untuk menjaga kinerja server tetap optimal dan mencegah panas berlebih pusat data bergantung pada sistem pendinginan berkapasitas besar.

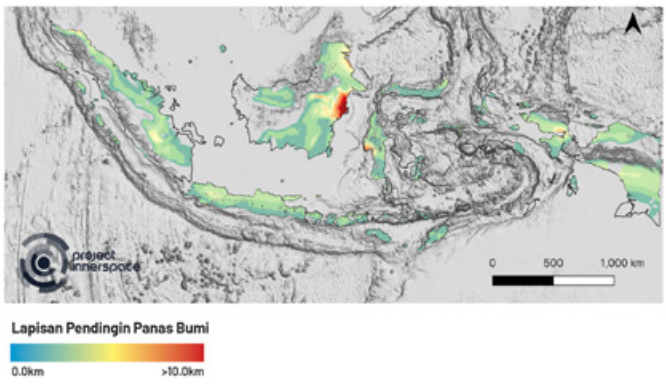
Ekspansi yang sangat cepat ini menghadirkan tantangan besar berupa lonjakan permintaan listrik yang diperkirakan mencapai 1.400 megawatt beban teknologi informasi dan 700 megawatt beban pendinginan di Indonesia pada 2030.[44]

PETA KELAYAKAN PUSAT DATA



Gambar 4.23: Peta yang menunjukkan potensi panas bumi kumulatif dalam satuan gigawatt pada kedalaman antara 0 meter hingga 5.000 meter di seluruh dunia dengan ambang batas suhu 150°C sebagai batas minimum pembangkitan listrik. Peta ini digabungkan dengan peta jarak terhadap simpul serat optik untuk menghasilkan peta tingkat kelayakan. Sumber: Project InnerSpace. (2025). *Today's global data center favorability Map at 5000 m* [Data Centers Module]. GeoMap.

LAPISAN RESERVOIR PENDINGIN PANAS BUMI



Gambar 4.24: Energi panas bumi tidak hanya untuk pembangkitan listrik tetapi juga merupakan solusi pendinginan terobosan. Peta ini menyoroti akuifer sedimen yang mengandung air asin atau payau di bawah muka air tanah sehingga tidak mengganggu air minum yang layak serta memiliki porositas dan permeabilitas alami yang menjadikannya ideal untuk aplikasi pendinginan. Sumber: Project InnerSpace. (2025). *Geothermal cooling layer* [Data Centers Module]. GeoMap.



Saat ini pusat data terkonsentrasi di kawasan ekonomi Jabodetabek. Kota Batam yang terletak di seberang Singapura dengan cepat berkembang menjadi pusat sekunder untuk menangkap limpahan permintaan dari negara tersebut.[45] Hal ini merupakan kabar baik karena kedua wilayah tersebut memiliki potensi pendinginan panas bumi yang kuat sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.23**.

Teknologi panas bumi generasi berikutnya menawarkan peluang strategis bagi pusat data di Indonesia melalui dua jalur utama:

- **Pembangkit Listrik *behind-the-meter*:** Penempatan pusat data yang berdekatan dengan sumber daya panas bumi menyediakan pasokan listrik yang bersih stabil dan langsung di lokasi. Analisis terbaru yang berfokus pada Amerika Serikat menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat menurunkan biaya listrik rata rata antara 31% hingga 45% dibandingkan model konvensional yang bergantung pada jaringan. Analisis tersebut juga menunjukkan bahwa panas bumi secara ekonomis dapat memenuhi sekitar dua pertiga dari proyeksi permintaan energi pusat data. [46] Besaran penghematan di Indonesia akan bergantung pada faktor lokal seperti tarif jaringan dan biaya pengeboran panas bumi. Namun, temuan di Amerika Serikat memberikan pembelajaran penting bagi Indonesia. Sejumlah inisiatif telah mulai muncul termasuk rencana pembangunan pusat data di dekat pembangkit panas bumi besar di Jawa Barat[47] serta fasilitas pusat data berbasis panas bumi di Jakarta, Bandung, dan Sumatra melalui skema Sertifikat Energi Terbarukan dari PLN.
- **Pendinginan Langsung Panas Bumi:** Dengan menggantikan sistem pendinginan konvensional, teknologi pendinginan langsung berbasis panas bumi dapat mengurangi hingga 40% dari total konsumsi energi pusat data.[48] Penerapan sistem ini akan secara signifikan menurunkan beban listrik jaringan nasional terutama di wilayah dengan permintaan tinggi. Untuk menghasilkan dampak terbesar, pengembang perlu memprioritaskan penerapan pendinginan langsung panas bumi pada proyek pusat data di Jabodetabek dan Batam.

Indonesia merupakan pemimpin global dalam panas bumi. Di tengah meningkatnya kebutuhan perusahaan akan energi bersih dan stabil untuk pusat data hanya sedikit negara yang memiliki potensi pusat data berbasis panas bumi sebesar Indonesia.

Untuk mengembangkan sektor ini secara optimal diperlukan kebijakan yang terarah dan dukungan teknis yang kuat sebagaimana dijelaskan dalam Bab 7 "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia". Prioritas utama meliputi hal hal berikut:

- Regulasi yang lebih jelas untuk sistem pembangkitan listrik behind the meter
- Penetapan hak sumber daya panas bumi khusus untuk aplikasi pendinginan pemanfaatan langsung
- Peningkatan data bawah permukaan untuk mendukung pengembangan sistem panas bumi enhanced dan advanced sehingga memperluas pilihan lokasi pusat data

Untuk informasi lebih lanjut mengenai lanskap energi dan pendinginan untuk pusat data di Indonesia, lihat **Gambar 4.23** and **4.24**.

Proyeksi untuk Tahun 2030

- ~1400 megawatts kapasitas beban IT
- ~700 megawatts beban pendinginan, dengan asumsi PUE (*power usage effectiveness*) 1,5 (teknologi pendinginan yang lebih efisien)
- ~6,132 gigawatt-hours energi yang dibutuhkan untuk pendinginan per tahun

Sumber: Mordor Intelligence. (2025). *Indonesia data center cooling market size and share analysis—growth trends & forecasts (2025-2031)*.

Distribusi Lokasi Pusat Data

- 150 pusat data dari 25 pasar di Indonesia
- **Jabodetabek:** Pusat utama, yang diuntungkan dari jaringan serat padat dan kedekatan dengan bisnis besar serta entitas pemerintah
- **Batam:** Alternatif pusat yang muncul, titik pendaratan kunci untuk kabel bawah laut internasional baru yang menawarkan jaringan listrik andal dan kedekatan strategis dengan Singapura

Sumber: Project InnerSpace, 2025; Data Center Map. (n.d.). *Indonesia data centers*.



Pemetaan Spasial Potensi Panas Bumi Pemanfaatan Langsung

Kunci untuk menentukan lokasi terbaik pemasangan panas bumi pemanfaatan langsung adalah mengidentifikasi kesesuaian antara permintaan energi dan suhu bawah permukaan yang paling optimal.

Untuk menilai kondisi bawah permukaan digunakan data tahun 2024 dari Direktorat Data dan Komputasi mengenai suhu lingkungan serta berbagai himpunan data suhu bawah permukaan lainnya.[49,50,51] Kualitas data bervariasi antar wilayah namun data terbaik tersedia untuk Jawa, Sumatra Utara, dan Riau karena adanya aktivitas eksplorasi panas bumi serta minyak dan gas sebelumnya.

Sebagaimana telah dijelaskan aplikasi pemanfaatan langsung umumnya dapat dikembangkan tanpa harus mencapai sumber daya bersuhu tinggi pada kedalaman besar yang biasanya dibutuhkan untuk pembangkitan listrik. Bahkan sumber daya bersuhu rendah hingga menengah pada kedalaman yang lebih dangkal sering kali lebih ekonomis dibandingkan sumber daya bersuhu tinggi pada kedalaman yang jauh lebih dalam. Kedalaman ditemukannya suhu yang dapat dimanfaatkan memengaruhi teknologi yang digunakan serta kelayakan proyek.

Sebagian fasilitas pemanfaatan langsung yang telah ada memanfaatkan uap berlebih dari pembangkit listrik atau manifestasi permukaan. Di wilayah yang tidak memiliki kondisi tersebut anomali panas dangkal menjadi target yang layak untuk pengeboran dekat permukaan sehingga memungkinkan pemanfaatan panas bumi tanpa biaya pengeboran dalam. Studi ini menekankan potensi pengeboran dangkal di wilayah wilayah tanpa manifestasi tersebut.

Panas yang Mudah Diakses

Analisis suhu berdasarkan kedalaman (**Gambar 4.25**, **4.26**, and **4.27**) mengonfirmasi bahwa Indonesia memiliki banyak wilayah dengan suhu bawah permukaan antara 30°C hingga 50°C pada kedalaman dangkal hingga sedang yaitu kurang dari 1.000 meter. Kondisi ini menjadikan wilayah tersebut sesuai untuk berbagai aplikasi pemanfaatan langsung dengan biaya yang kompetitif termasuk pemanasan industri dan pemandian.

Suhu Tanah Dangkal yang Sesuai untuk GSHP

Data suhu tanah dangkal pada kedalaman 2 meter digunakan untuk menilai dan mengidentifikasi wilayah yang sesuai bagi penerapan GSHP dangkal.[52] Dengan membandingkan suhu tanah dangkal dan suhu udara ambien dapat diidentifikasi wilayah dengan potensi pertukaran panas yang efisien dengan tanah yang lebih dingin mendukung pendinginan dan tanah yang lebih hangat mendukung pemanasan. Semakin besar perbedaan suhu semakin tinggi efisiensi GSHP. **Gambar 4.28** menunjukkan distribusi spasial untuk mendukung pemilihan lokasi penerapan GSHP di Indonesia. Untuk pemahaman lebih lanjut mengenai potensi panas bumi generasi berikutnya lihat Lampiran Bab 3 "Memperluas Cakupan: Peluang Pengembangan Geotermal Generasi Baru."

Keterbatasan dan Arah ke Depan

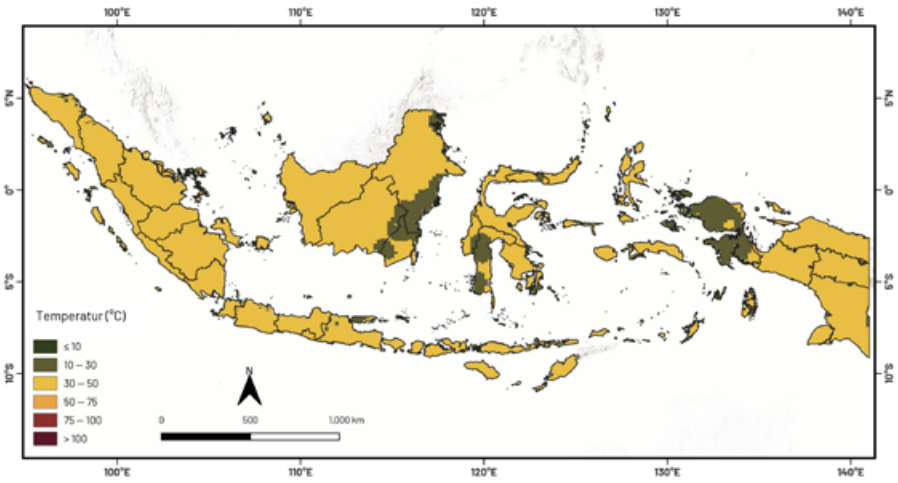
Pemetaan permintaan energi termal dan suhu bawah permukaan menunjukkan bahwa banyak wilayah di Indonesia terutama di Jawa dan sebagian Sumatra memiliki potensi untuk pemanfaatan langsung panas bumi. Namun, tingkat kesesuaian pada akhirnya ditentukan oleh faktor seperti permeabilitas dan teknologi yang dibutuhkan.

Wilayah yang secara geologi dikendalikan oleh permeabilitas primer, seperti lingkungan sedimen pengisi graben, dapat dievaluasi melalui pemetaan litologi dan kajian rinci. Sementara itu wilayah dengan rezim tektonik aktif dapat memiliki sesar dan struktur yang berfungsi sebagai zona permeabilitas sekunder. Oleh karena itu, wilayah yang dicirikan oleh permeabilitas sekunder dapat diidentifikasi melalui manifestasi permukaan dan penilaian struktur berbasis geofisika. Secara konseptual wilayah dengan permeabilitas tinggi lebih sesuai untuk aliran fluida dan perpindahan panas.

Sementara beberapa aplikasi seperti pompa kalor dapat beroperasi pada suhu yang lebih rendah dengan kebutuhan bawah permukaan yang minimal, aplikasi lain memerlukan suhu yang lebih tinggi dan permeabilitas yang lebih baik seperti chiller absorpsi. Penyesuaian teknologi dengan kondisi lokal serta pelaksanaan kajian spesifik per sektor merupakan langkah penting. Mengingat setiap sektor industri memiliki kebutuhan sumber daya

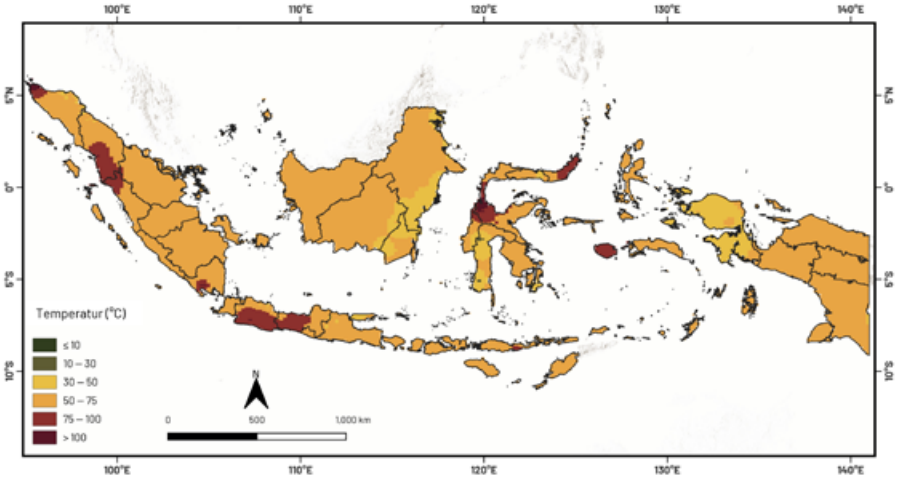


TEMPERATUR PADA KEDALAMAN 100 METER



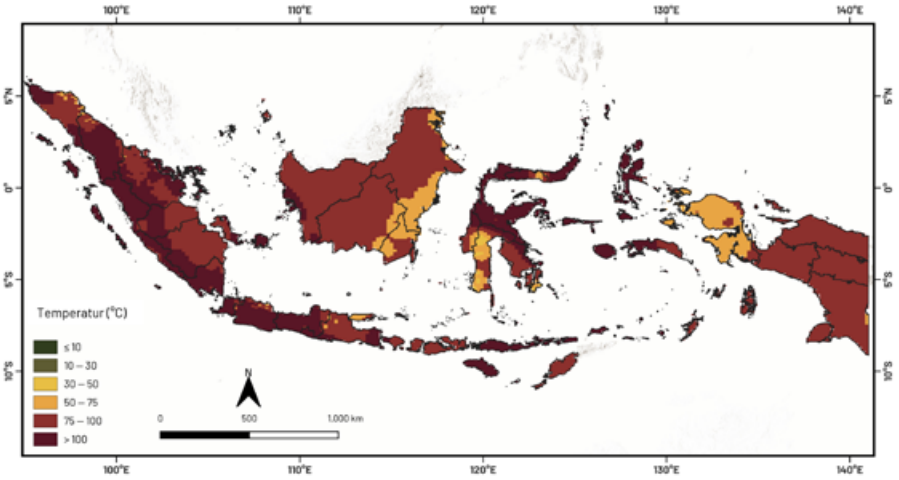
Gambar 4.25: Distribusi suhu pada kedalaman 100 meter berdasarkan data sumur panas bumi yang tersedia serta perhitungan suhu dari aliran panas gradien suhu dan konduktivitas rata rata. Sumber: International Heat Flow Commission (IHFC). (n.d.). *The global heat flow database*.

TEMPERATUR PADA KEDALAMAN 500 METER



Gambar 4.26: Distribusi suhu pada kedalaman 500 meter berdasarkan data sumur panas bumi yang tersedia serta perhitungan suhu dari aliran panas gradien suhu dan konduktivitas rata rata. Sumber: International Heat Flow Commission (IHFC). (n.d.). *The global heat flow database*.

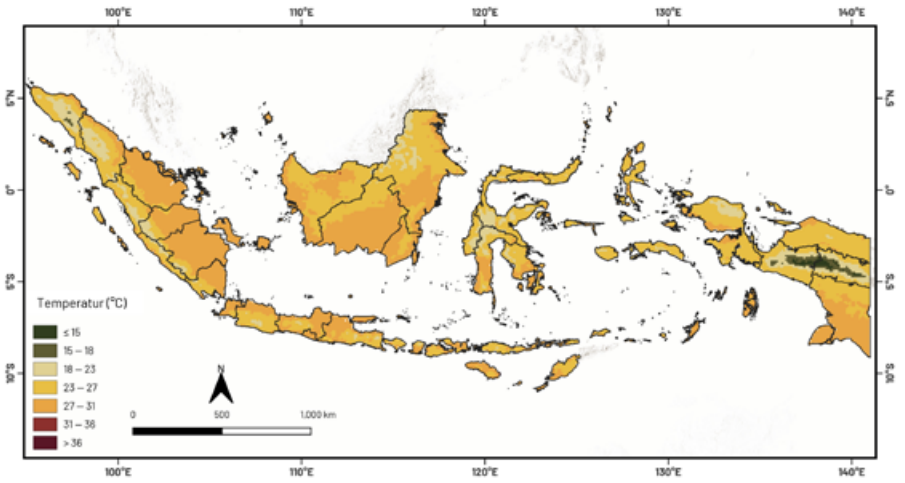
TEMPERATUR PADA KEDALAMAN 1000 METER



Gambar 4.27: Distribusi suhu pada kedalaman 1.000 meter berdasarkan data sumur panas bumi yang tersedia serta perhitungan suhu dari aliran panas gradien suhu dan konduktivitas rata rata. Sumber: International Heat Flow Commission (IHFC). (n.d.). *The global heat flow database*.

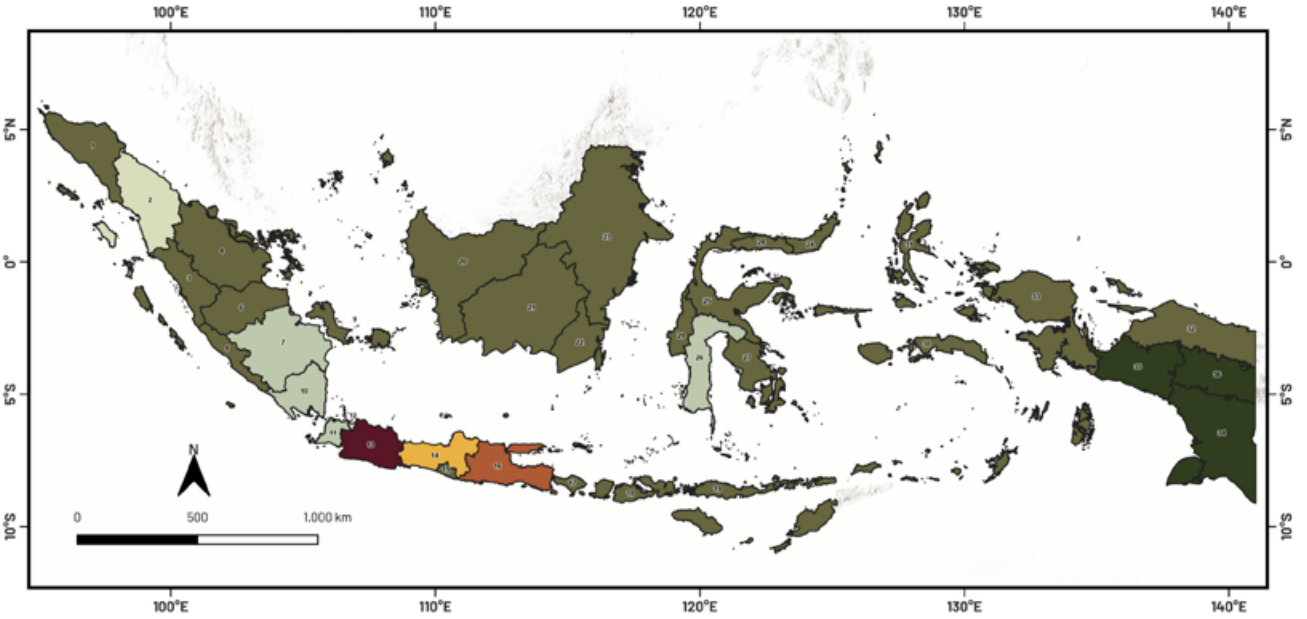


DISTRIBUSI TEMPERATUR TANAH DANGKAL



Gambar 4.28: Distribusi rata rata tahunan suhu tanah dangkal pada 2024 di kedalaman 2 meter. Wilayah berwarna khaki dan oranye menunjukkan efisiensi GSHP terbaik. Data dihasilkan melalui pemodelan permukaan darat berbasis fisika dengan menggunakan input meteorologi aktual seperti suhu udara curah hujan radiasi matahari dan kelembapan tanah. Sumber: Copernicus Climate Change Service (C3S). (2025). *Thermal comfort indices derived from ERA5 reanalysis* [Data set]. Climate Data Store (CDS).

KEBUTUHAN PENDINGINAN PADA SEKTOR RUMAH TANGGA PER PROVINSI DI INDONESIA



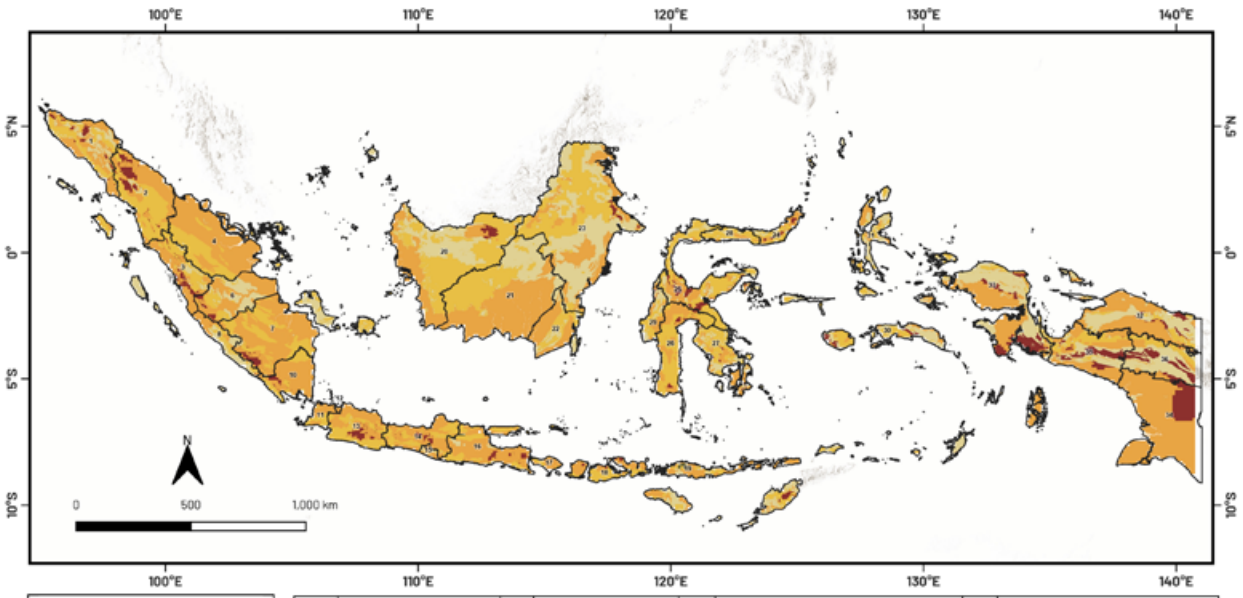
Kebutuhan Pendinginan untuk Sektor Residensial

- 0 – 3,000
- 3,000 – 25,000
- 25,000 – 45,000
- 45,000 – 75,000
- 75,000 – 100,000
- 100,000 – 125,000
- 125,000 – 150,000
- > 150,000

NO	PROVINSI	KEBUTUHAN TERMAL (TJ)	NO	PROVINSI	KEBUTUHAN TERMAL (TJ)	NO	PROVINSI	KEBUTUHAN TERMAL (TJ)	NO	PROVINSI	KEBUTUHAN TERMAL (TJ)
1	Aceh	16,610	10	Lampung	27,485	19	Nusa Tenggara Timur	13,753	28	Gorontalo	3,703
2	Sumatera Utara	47,261	11	Banten	41,007	20	Kalimantan Barat	16,754	29	Sulawesi Barat	3,911
3	Sumatera Barat	16,282	12	DKI Jakarta	54,136	21	Kalimantan Tengah	8,983	30	Maluku	3,592
4	Riau	22,634	13	Jawa Barat	174,264	22	Kalimantan Selatan	15,143	31	Maluku Utara	5,142
5	Kepulauan Riau	3,338	14	Jawa Tengah	121,043	23	Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara	15,823	32	Papua	6,162
6	Jambi	12,078	15	DI Yogyakarta	15,072	24	Sulawesi Utara	8,536	33	Papua Barat dan Papua Barat Daya	3,394
7	Sumatera Selatan	27,120	16	Jawa Timur	138,799	25	Sulawesi Tengah	10,110	34	Papua Selatan	0
8	Bengkulu	6,920	17	Bali	15,630	26	Sulawesi Selatan	29,197	35	Papua Tengah	0
9	Kep. Bangka Belitung	5,607	18	Nusa Tenggara Barat	20,326	27	Sulawesi Tenggara	8,419	36	Papua Pegunungan	0

Gambar 4.29: Pemetaan permintaan dasar pendinginan sektor residensial pada 2023 berdasarkan provinsi di Indonesia. TJ = terajoule. Sumber: Diadaptasi dari PLN. (2024). *Statistics 2023*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Riau Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jawa Tengah Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Sumatera Selatan Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jambi Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *East Java Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *West Java Province in figures 2024*.

PETA KESESUAIAN KEBUTUHAN HVAC RESIDENSIAL, 2023



NO	PROVINSI	NO	PROVINSI	NO	PROVINSI	NO	PROVINSI
1	Aceh	10	Lampung	19	Nusa Tenggara Timur	28	Gorontalo
2	Sumatera Utara	11	Banten	20	Kalimantan Barat	29	Sulawesi Barat
3	Sumatera Barat	12	DKI Jakarta	21	Kalimantan Tengah	30	Maluku
4	Riau	13	Jawa Barat	22	Kalimantan Selatan	31	Maluku Utara
5	Kepulauan Riau	14	Jawa Tengah	23	Kalimantan Timur dan Kalimantan	32	Papua
6	Jambi	15	DI Yogyakarta	24	Sulawesi Utara	33	Papua Barat dan Papua Barat
7	Sumatera Selatan	16	Jawa Timur	25	Sulawesi Tengah	34	Papua Selatan
8	Bengkulu	17	Bali	26	Sulawesi Selatan	35	Papua Tengah
9	Kep. Bangka Belitung	18	Nusa Tenggara Barat	27	Sulawesi Tenggara	36	Papua Pegunungan

Gambar 4.30: Peta kesesuaian HVAC residensial berdasarkan permintaan energi termal dasar 2023 perbedaan suhu udara dan tanah serta konduktivitas termal kualitatif formasi dangkal. Sumber: Diadaptasi dari PLN. (2024). *Statistics 2023*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Riau Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jawa Tengah Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Sumatera Selatan Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jambi Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *East Java Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *West Java Province in figures 2024*.

yang berbeda diperlukan evaluasi yang lebih terarah dan mendalam untuk menentukan tingkat kesesuaian aktual secara kasus per kasus.

Temuan ini menunjukkan adanya peluang realistis bagi Indonesia untuk memanfaatkan panas bumi alaminya guna memenuhi sebagian besar kebutuhan pemanasan dan pendinginan di masa depan sekaligus memberikan jalur yang jelas untuk mendukung target transisi menuju energi yang lebih bersih. Potensi ini terutama signifikan untuk pengurangan emisi karbon melalui penerapan GSHP untuk pendinginan rumah tangga serta sistem pemanfaatan langsung untuk pendinginan bangunan komersial di mana kebutuhan energi termal diperkirakan tumbuh paling cepat.

PELUANG TERBESAR PENDINGINAN DI JAWA DAN PEMANASAN PROSES DI AGRIBISNIS

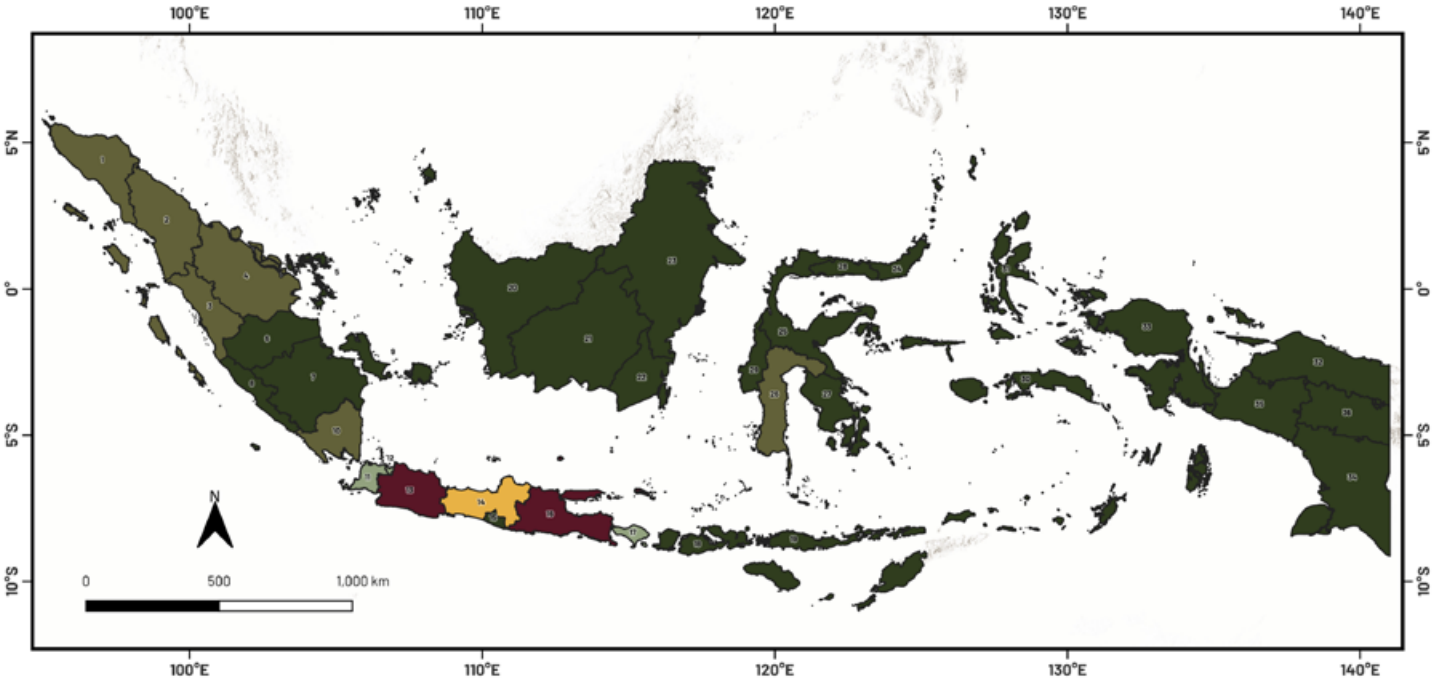
Evaluasi menyeluruh terhadap permintaan energi termal ketersediaan sumber daya potensi ekonomi serta kesiapan teknologi mengidentifikasi dua peluang dengan dampak terbesar yaitu pendinginan di Jawa dan pemanasan proses di sektor agribisnis.

Pendinginan di Pusat Perkotaan Jawa

Provinsi-provinsi di Pulau Jawa yang padat penduduk dan memiliki peran ekonomi strategis menunjukkan tingkat permintaan tertinggi serta kesesuaian geologi yang sangat baik. Penerapan teknologi pendinginan panas bumi di Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa



KEBUTUHAN ENERGI PANAS DASAR UNTUK HVAC KOMERSIAL PER PROVINSI DI INDONESIA

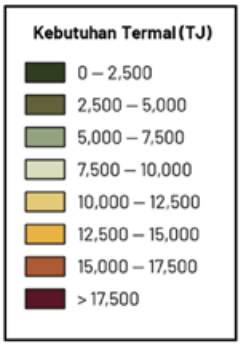


NO	PROVINSI	KEBUTUHAN TERMAL (TJ)
1	Aceh	4,002
2	Sumatera Utara	3,865
3	Sumatera Barat	4,654
4	Riau	4,267
5	Kepulauan Riau	742
6	Jambi	1,368
7	Sumatera Selatan	1,584
8	Bengkulu	510
9	Kep. Bangka Belitung	976

NO	PROVINSI	KEBUTUHAN TERMAL (TJ)
10	Lampung	2,633
11	Banten	5,720
12	DKI Jakarta	7,412
13	Jawa Barat	20,350
14	Jawa Tengah	14,014
15	DI Yogyakarta	1,769
16	Jawa Timur	18,047
17	Bali	5,959
18	Nusa Tenggara Barat	1,018

NO	PROVINSI	KEBUTUHAN TERMAL (TJ)
19	Nusa Tenggara Timur	885
20	Kalimantan Barat	2,026
21	Kalimantan Tengah	1,722
22	Kalimantan Selatan	1,828
23	Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara	2,283
24	Sulawesi Utara	699
25	Sulawesi Tengah	681
26	Sulawesi Selatan	2,746
27	Sulawesi Tenggara	734

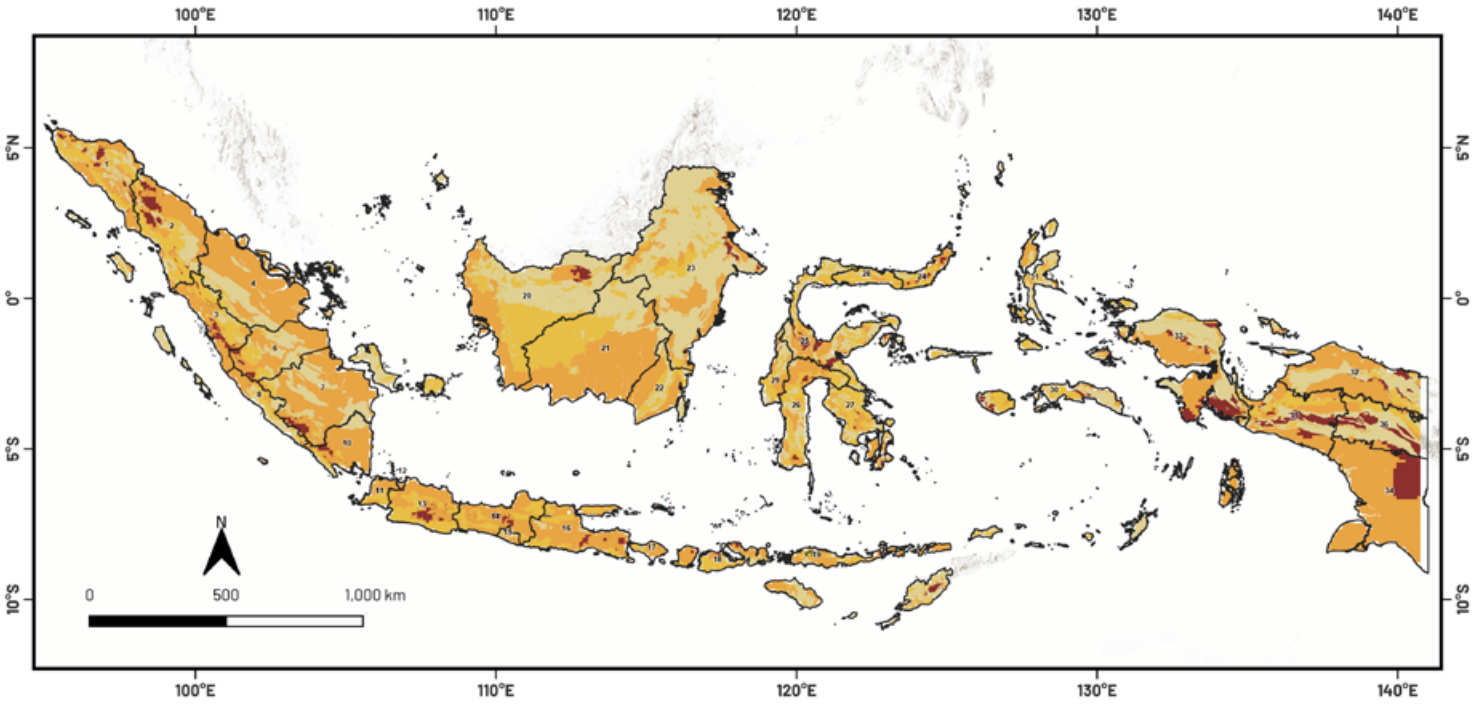
NO	PROVINSI	KEBUTUHAN TERMAL (TJ)
28	Gorontalo	255
29	Sulawesi Barat	307
30	Maluku	277
31	Maluku Utara	348
32	Papua	808
33	Papua Barat dan Papua Barat Daya	409
34	Papua Selatan	0
35	Papua Tengah	0
36	Papua Pegunungan	0



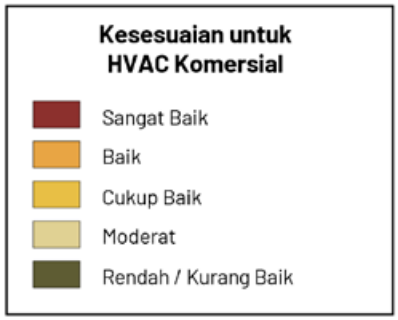
Gambar 4.31: Pemetaan permintaan energi termal dasar HVAC komersial pada 2023 berdasarkan provinsi di Indonesia. TJ = terajoule. Sumber: Diadaptasi dari PLN. (2024). *Statistics 2023*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Riau Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jawa Tengah Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Sumatera Selatan Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jambi Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *East Java Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *West Java Province in figures 2024*.

Timur berpotensi menurunkan konsumsi listrik secara signifikan mengurangi beban puncak meningkatkan keandalan sistem serta menghindari kebutuhan investasi ekspansi kapasitas yang mahal. Prioritas utama pemanfaatan langsung di wilayah ini adalah penyediaan pendinginan untuk bangunan dimulai dari gedung komersial besar atau fasilitas publik seperti rumah sakit. **Gambar 4.29** dan **4.30** memetakan distribusi permintaan pendinginan dan kesesuaiannya, secara berurutan, untuk pendinginan rumah tangga melalui GSHP di Indonesia. Untuk pendinginan komersial, **Gambar 4.31** dan **4.32** menampilkan permintaan serta tingkat kesesuaian sumber daya panas bumi yang tersedia.

KESESUAIAN UNTUK PENDINGINAN KOMERSIAL



NO	PROVINSI	NO	PROVINSI	NO	PROVINSI	NO	PROVINSI
1	Aceh	10	Lampung	19	Nusa Tenggara Timur	28	Gorontalo
2	Sumatera Utara	11	Banten	20	Kalimantan Barat	29	Sulawesi Barat
3	Sumatera Barat	12	DKI Jakarta	21	Kalimantan Tengah	30	Maluku
4	Riau	13	Jawa Barat	22	Kalimantan Selatan	31	Maluku Utara
5	Kepulauan Riau	14	Jawa Tengah	23	Kalimantan Timur dan Kalimantan	32	Papua
6	Jambi	15	DI Yogyakarta	24	Sulawesi Utara	33	Papua Barat dan Papua Barat
7	Sumatera Selatan	16	Jawa Timur	25	Sulawesi Tengah	34	Papua Selatan
8	Bengkulu	17	Bali	26	Sulawesi Selatan	35	Papua Tengah
9	Kep. Bangka Belitung	18	Nusa Tenggara Barat	27	Sulawesi Tenggara	36	Papua Pegunungan



Gambar 4.32: Peta kesesuaian HVAC komersial yang menyoroti potensi tinggi yang terkonsentrasi di Jawa dan sebagian Sumatra. Sumber: Diadaptasi dari PLN. (2024). *Statistics 2023*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Riau Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jawa Tengah Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Sumatera Selatan Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jambi Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *East Java Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *West Java Province in figures 2024*.



PENDINGINAN DISTRIK PANAS BUMI UNTUK BANGUNAN KOMERSIAL DAN RESIDENSIAL

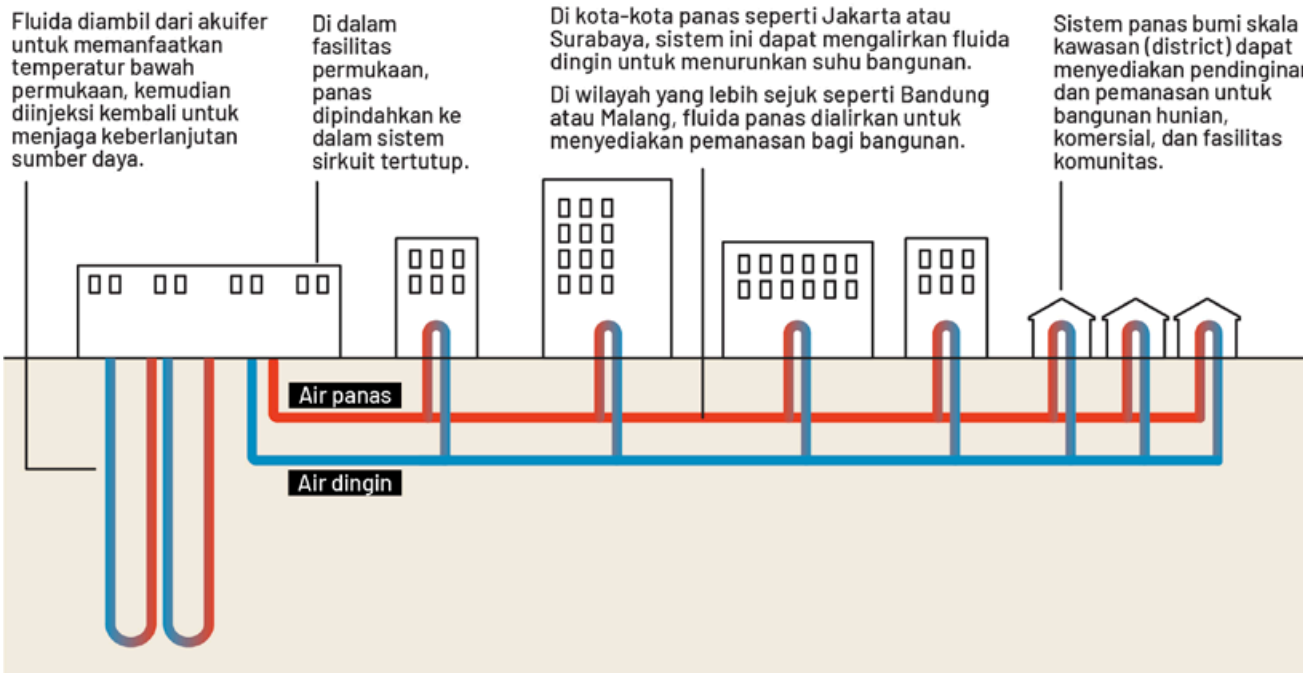
Dengan suhu lingkungan rata-rata sekitar 27 derajat Celsius pendinginan bukan hanya kebutuhan musiman melainkan kebutuhan sepanjang tahun. Indonesia menghadapi kebutuhan mendesak akan sistem pendinginan bangunan yang efisien dan berkelanjutan.

Energi panas bumi merupakan salah satu bentuk pendinginan paling efisien yang tersedia dan menawarkan jalur menuju ketahanan energi ketangguhan ekonomi serta masa depan berkelanjutan.

Zona Target: Kesesuaian Permintaan dan Sumber Daya Panas Bumi

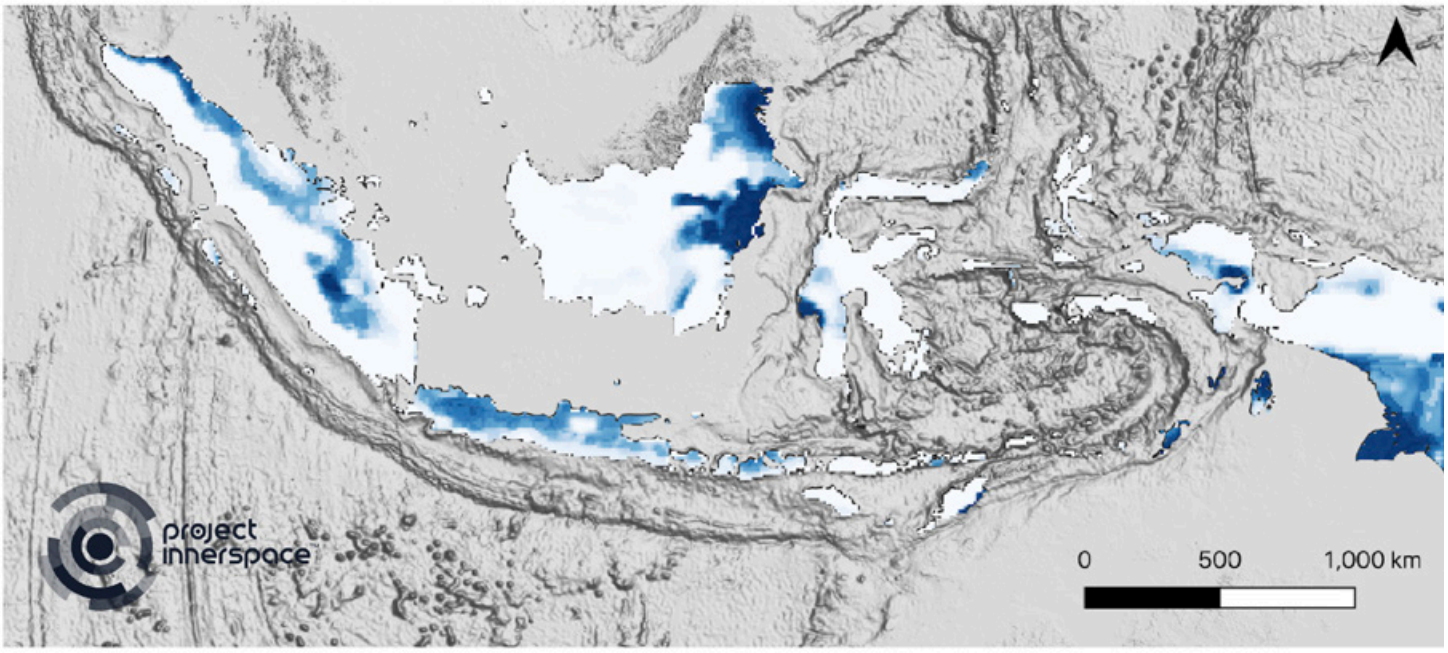
- Potensi pendinginan terbesar Indonesia terkonsentrasi di **Jawa Barat**, **Jawa Tengah** dan **Jawa Timur** yang merupakan pusat ekonomi dan manufaktur utama.
- Wilayah **Jabodetabek** sebagai pusat bisnis dan pemerintahan nasional juga memiliki potensi pendinginan yang signifikan.
- **Sumatra Utara** khususnya Medan dan Jambi menunjukkan potensi yang baik untuk pendinginan residensial karena kepadatan penduduk yang tinggi.
- Kota Balikpapan, Banjarmasin, dan Samarinda di Kalimantan merupakan kandidat awal untuk proyek pendinginan distrik berbasis panas bumi.

JARINGAN PENDINGINAN DAN PEMANASAN PANAS BUMI



Gambar 4.33: Fluida dalam sistem pendinginan distrik umumnya dibawa ke permukaan pada suhu target sekitar 21 derajat Celsius. Fluida ini kemudian dialirkan melalui pompa kalor untuk menghasilkan air dingin pada musim panas dan air panas pada musim dingin. Sistem ini dapat lebih dari dua kali lebih efisien dibandingkan sistem HVAC konvensional karena beban termal dibagi antar bangunan. Sumber: Diadaptasi dari U.S. Department of Energy. *Geothermal district heating & cooling*.

KOTA YANG PALING SESUAI UNTUK DISTRICT COOLING



Potensi Pendinginan Spasial dalam GW

(≥90°C, ≤5km)

0 8

Gambar 4.34: Peta yang menggambarkan potensi kumulatif hingga kedalaman 4.000 meter dalam satuan PJ per kilometer persegi yang merepresentasikan potensi termal cekungan sedimen. Peta ini menggunakan ambang suhu bawah permukaan 90°C dan suhu permukaan 15°C untuk menekankan wilayah lintang hangat yang berpotensi memanfaatkan pendinginan panas bumi. Kepadatan penduduk ditampilkan sebagai lapisan tambahan. Sumber: Project InnerSpace. (2025). *Spatial cooling 90°C 4000 m cumulative PJ/km²* [Global Volumetric, LCOE, and LCOH Models Underpinning the IEA Geothermal Report Module]. GeoMap; Project InnerSpace. (2025). *Cities for spatial cooling* [Global Volumetric, LCOE, and LCOH Models Underpinning the IEA Geothermal Report Module]. GeoMap.

BERDASARKAN ANGKA

- **365 hari per tahun:** Seberapa sering pendinginan dibutuhkan karena iklim khatulistiwa Indonesia[53]
- **338 juta:** Proyeksi populasi Indonesia pada tahun 2050, berdasarkan proyeksi dari Badan Pusat Statistik Indonesia dan utilitas permintaan pendinginan urbanisas[54]
- **1°C –1.5°C:** Kenaikan suhu yang diproyeksikan pada tahun 2050.[55]

PEMANFAATAN LANGSUNG UNTUK PEMANASAN PROSES AGROINDUSTRI

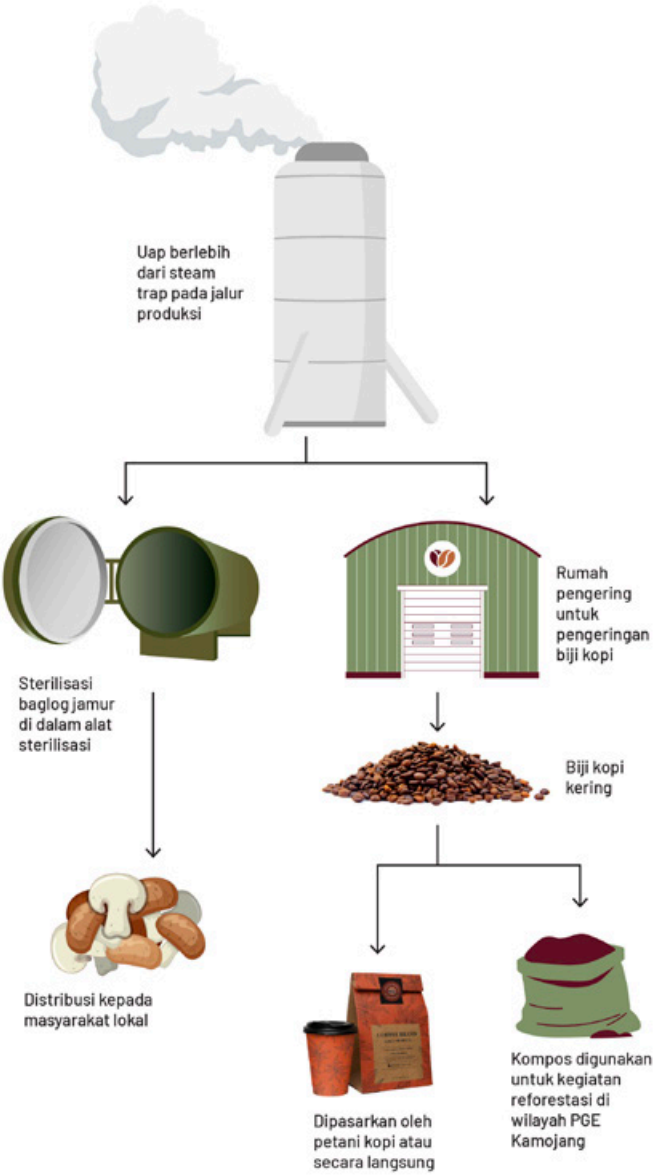
Proyek yang Berjalan Saat Ini

Saat ini aplikasi pemanfaatan langsung panas bumi di sektor pertanian dan industri sebagian besar dikembangkan melalui inisiatif tanggung jawab sosial perusahaan dan umumnya berskala kecil seperti pemanasan rumah kaca atau pengeringan dengan kemitraan bersama masyarakat lokal.

Sejumlah proyek percontohan di sektor pertanian mulai menunjukkan bagaimana pemanfaatan langsung panas bumi dapat memanfaatkan sumber daya bersuhu rendah hingga menengah terutama di wilayah dataran tinggi tempat sumber daya bawah permukaan dan aktivitas pertanian saling beririsan. Lapangan panas bumi Kamojang merupakan contoh utama. Untuk mendukung masyarakat sekitar, PT Pertamina Geothermal Energy memanfaatkan uap berlebih yang ditangkap dari sistem perangkap uap pembangkit listrik panas bumi untuk proses seperti sterilisasi jamur dan pengolahan limbah organik menjadi kompos (**Gambar 4.35)**.

Berbagai aplikasi pemanfaatan langsung yang diterapkan oleh PT Pertamina Geothermal Energy memberikan bukti nyata pemanfaatan panas bumi untuk keperluan pertanian. Meskipun saat ini masih berskala kecil dan lokal inisiatif ini menunjukkan kelayakan teknis serta nilai sosial ekonomi dari proyek pemanfaatan langsung dan menjadi fondasi bagi investasi di masa depan. Contoh ini juga dapat memperkuat penerimaan sosial pengembang panas bumi di Indonesia dengan menghadirkan manfaat nyata bagi masyarakat. (lihat Bab 6, "Mencari Titik Temu: Membangun Kepercayaan dan Transparansi dalam Transisi Energi Indonesia"). Selain itu, pengembangan agroindustri telah diidentifikasi sebagai salah satu kegiatan pendukung dalam operasi panas bumi PT Pertamina Geothermal Energy. Apabila regulasi panas bumi lebih jelas dan mendukung aplikasi non kelistrikan inisiatif ini dapat direplikasi dan diperluas sehingga membuka sumber pendapatan tambahan bagi pengembang serta mendorong pengembangan sektor panas bumi nasional secara lebih luas. (Lihat Bab 7, "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia").

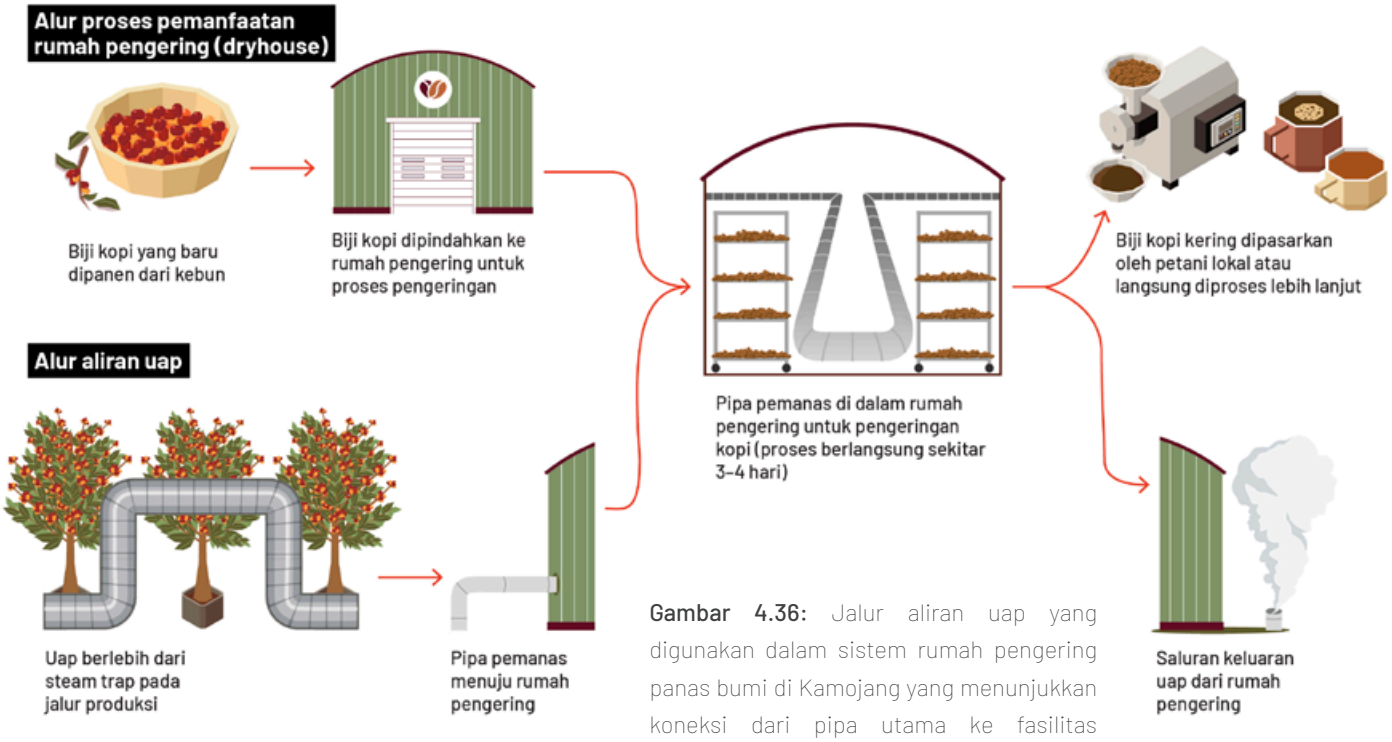
PEMANFAATAN UAP PANAS BUMI BERLEBIH UNTUK PERTANIAN



Gambar 4.35: Pemanfaatan uap panas bumi berlebih sebagai panas pemanfaatan langsung di lapangan panas bumi Kamojang. Sumber: Para penulis.

Di Canaya Coffee, para petani menggunakan rumah pengering berbasis panas bumi sebagai pengganti ketergantungan pada cuaca yang tidak menentu. Fasilitas ini berhasil memangkas waktu pengeringan biji kopi dari dua minggu menjadi tiga hingga empat hari. Penghematan waktu ini membantu petani

ALUR PANAS PROSES UNTUK PENGERINGAN KOPI DENGAN PEMANFAATAN LANGSUNG



Gambar 4.36: Jalur aliran uap yang digunakan dalam sistem rumah pengering panas bumi di Kamojang yang menunjukkan koneksi dari pipa utama ke fasilitas pengering. Sumber: Para penulis.

Penghematan waktu ini membantu petani menjaga kualitas produk memperoleh pendapatan yang lebih andal serta mengurangi ketidakpastian energi.

menjaga kualitas produk memperoleh pendapatan yang lebih andal serta mengurangi ketidakpastian energi (**Gambar 4.36**).

Model ini memberdayakan petani lokal untuk mengelola operasional harian sementara PT Pertamina Geothermal Energy memastikan penyediaan uap panas bumi secara berkelanjutan. Kemitraan ini memberikan manfaat bagi masyarakat dan lingkungan. Seiring meningkatnya permintaan terhadap Canaya Coffee investasi PT Pertamina Geothermal Energy memperkuat komitmen terhadap pembangunan pedesaan berkelanjutan dan solusi energi tangguh berbasis komunitas.[56]

Penerapan Pemanfaatan Langsung untuk Agribisnis ke Depan

Minat untuk memperluas pemanfaatan langsung panas bumi di sektor pertanian terus meningkat melalui berbagai proyek yang diusulkan dan dieksplorasi. Salah satu proyek yang direncanakan oleh PT Geo Dipa Energi di wilayah panas bumi Dieng bertujuan memanfaatkan panas bumi dalam rumah kaca untuk memproduksi bibit agroforestri berkualitas tinggi yang akan didistribusikan ke seluruh wilayah.

Panas bumi akan digunakan untuk sterilisasi media tanam yang terbuat dari cocopeat dan arang sekam. Benih akan disemai pada media tersebut kemudian dipindahkan ke area budidaya. Panas bumi juga akan didistribusikan di dalam rumah kaca untuk mengatur suhu dan kelembapan sehingga menjaga kondisi tumbuh yang optimal. Rencana ini mencakup pengembangan tanaman jangka panjang seperti jeruk alpukat dan kopi serta tanaman jangka pendek seperti Carica dan serai wangi untuk memastikan manfaat ekonomi jangka

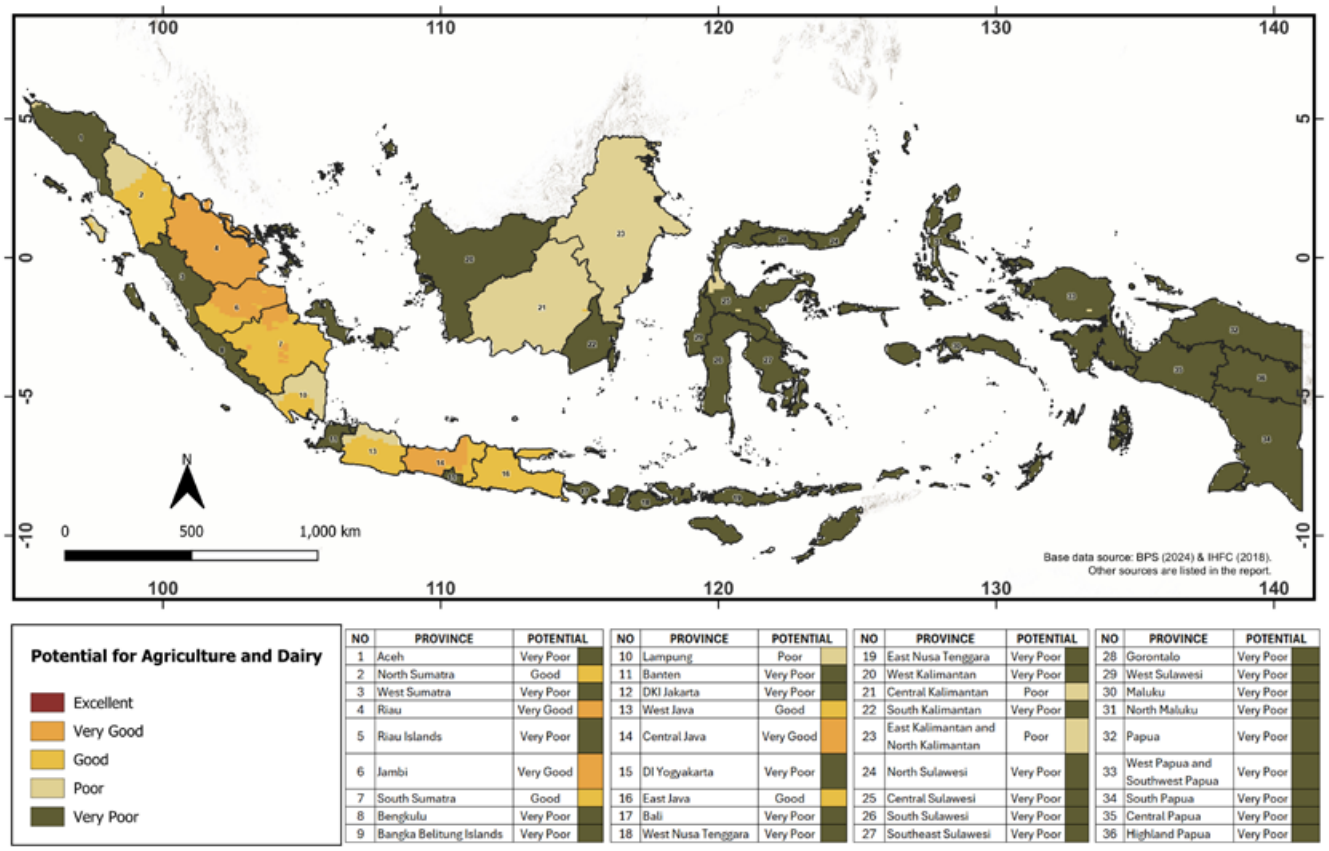
pendek dan jangka panjang sekaligus mendukung agroforestri dan mata pencaharian lokal.

Prioritas Tinggi

Berdasarkan kapasitas produksi provinsi pada 2023 tingkat permintaan energi termal dasar tertinggi untuk pemanasan proses (**Gambar 4.37**), serta lokasi sumber daya panas bumi yang berkualitas aplikasi pertanian seperti pengeringan kayu pengawetan buah dan sayuran pengeringan pangan serta pengolahan tebu dan kentang diidentifikasi sebagai sasaran awal untuk uji coba teknologi pemanfaatan langsung. Penerapan panas bumi untuk proses pemanasan di sektor pertanian dan produk susu memiliki potensi besar untuk mendukung perekonomian lokal dan produksi komoditas nasional.

Enam provinsi berikut dinilai paling sesuai karena kombinasi permintaan yang kuat dan sumber daya panas bumi dangkal (**Gambar 4.28** dan **4.37**):[57]

- **Riau:** pengeringan kayu, pengawetan buah dan sayuran, pengolahan dan pengeringan ikan
- **Jawa Tengah:** pengawetan buah dan sayuran, pengolahan produk susu
- **Jambi:** pengeringan kayu
- **Sumatra Selatan:** pengolahan dan pengeringan ikan
- **Jawa Timur:** pengolahan produk susu
- **Jawa Barat:** pengolahan dan pengeringan ikan



NO	PROVINCE	POTENTIAL
1	Aceh	Very Poor
2	North Sumatra	Good
3	West Sumatra	Very Poor
4	Riau	Very Good
5	Riau Islands	Very Poor
6	Jambi	Very Good
7	South Sumatra	Good
8	Bengkulu	Very Poor
9	Bangka Belitung Islands	Very Poor
10	Lampung	Poor
11	Banten	Very Poor
12	DKI Jakarta	Very Poor
13	West Java	Good
14	Central Java	Very Good
15	DI Yogyakarta	Very Poor
16	East Java	Good
17	Bali	Very Poor
18	West Nusa Tenggara	Very Poor
19	East Nusa Tenggara	Very Poor
20	West Kalimantan	Very Poor
21	Central Kalimantan	Poor
22	South Kalimantan	Very Poor
23	East Kalimantan and North Kalimantan	Poor
24	North Sulawesi	Very Poor
25	Central Sulawesi	Very Poor
26	South Sulawesi	Very Poor
27	Southeast Sulawesi	Very Poor
28	Gorontalo	Very Poor
29	West Sulawesi	Very Poor
30	Maluku	Very Poor
31	North Maluku	Very Poor
32	Papua	Very Poor
33	West Papua and Southwest Papua	Very Poor
34	South Papua	Very Poor
35	Central Papua	Very Poor
36	Highland Papua	Very Poor

Gambar 4.37: Peta kesesuaian setiap provinsi di Indonesia untuk pemanasan proses sektor pertanian dan produk susu menggunakan pemanfaatan langsung panas bumi berdasarkan permintaan energi termal dasar 2023 serta kedalaman yang dibutuhkan untuk mencapai suhu bawah permukaan 50°C. Sumber: analisis penulis dari data BPS-Statistics Indonesia pada seluruh provinsi; Copernicus Climate Change Service (C3S). (2025). *Thermal comfort indices derived from ERA5 reanalysis* [Data set]. Climate Data Store (CDS); International Heat Flow Commission (IHFC). (n.d.). *The global heat flow database*.

Langkah berikutnya yang diperlukan dan logis adalah melakukan studi kelayakan rinci untuk proses komoditas tersebut di masing-masing provinsi.

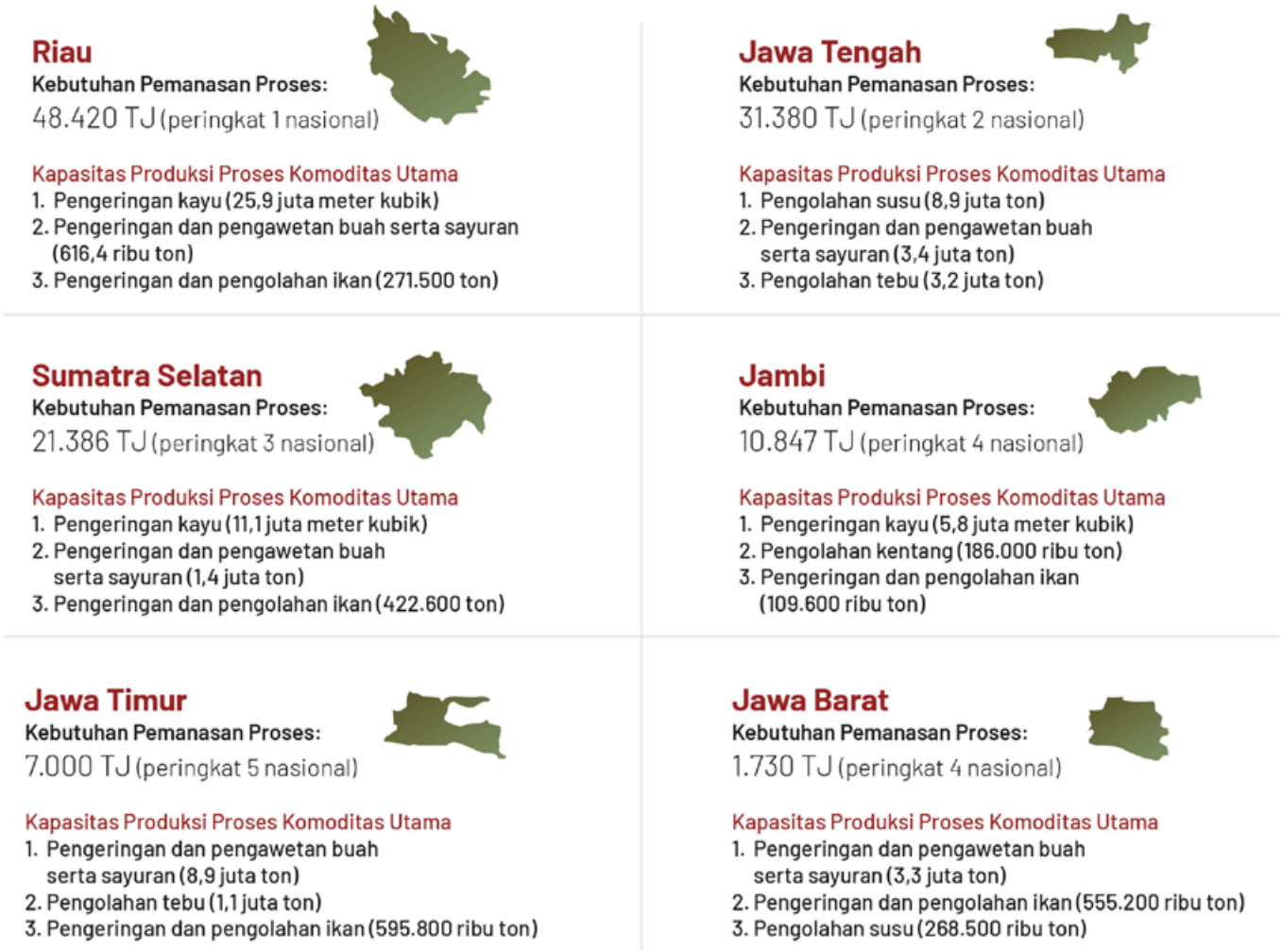
KESIMPULAN: PRIORITAS UTAMA DAN PETA JALAN IMPLEMENTASI

Sebagaimana ditegaskan dalam bab ini, terdapat peluang yang sangat besar bagi pemanfaatan langsung panas bumi untuk memenuhi kebutuhan energi termal Indonesia yang terus meningkat. Pendekatan yang jelas dan bertahap dapat membuka potensi tersebut dengan memfokuskan langkah awal pada sektor dan lokasi yang paling menjanjikan.

Peluang Utama

- Pendinginan residensial dan komersial merupakan prioritas tertinggi. Permintaan pendinginan di sektor residensial dan komersial diproyeksikan meningkat

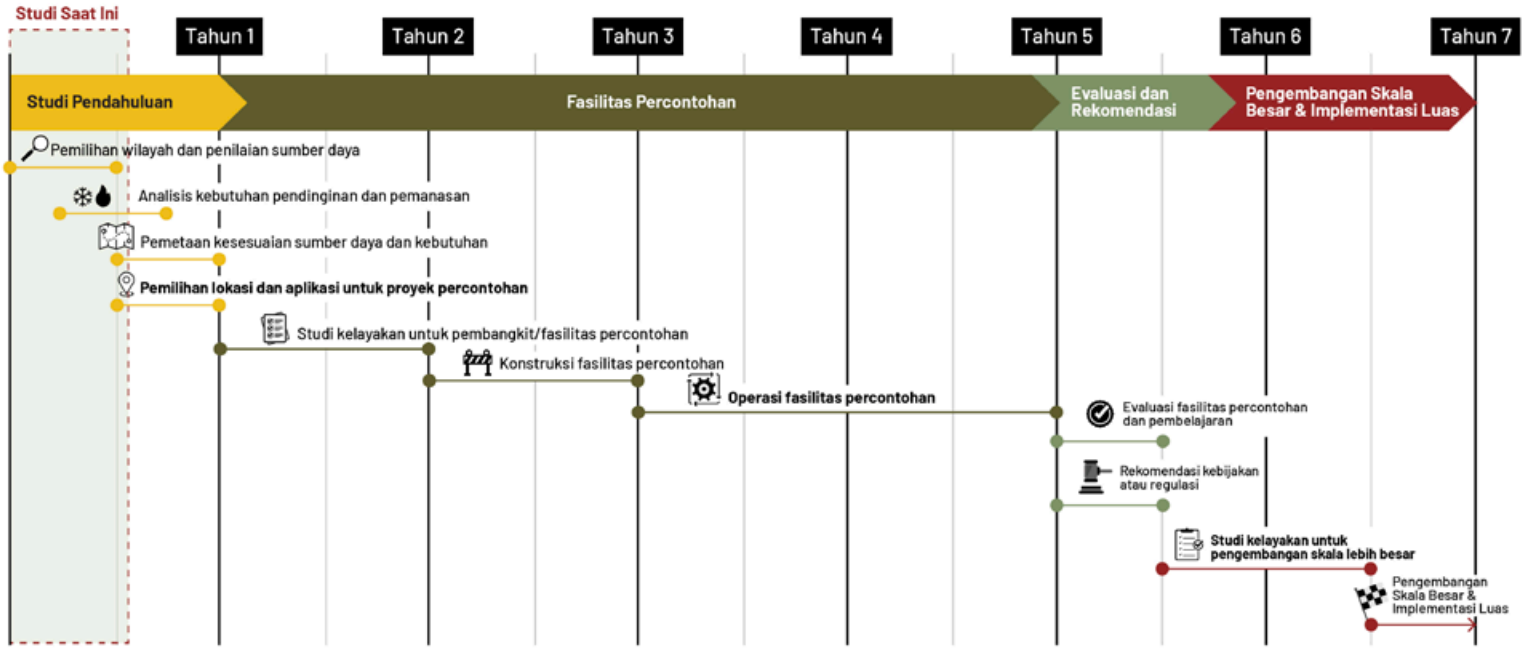
PELUANG TERBAIK PEMANASAN PROSES DI SEKTOR PERTANIAN



Gambar 4.38: Peluang berdampak tinggi untuk penerapan pemanfaatan langsung di sektor agroindustri dan produk susu di enam provinsi kaya panas bumi. Sumber: BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Riau Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jawa Tengah Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Sumatera Selatan Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *Jambi Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *East Java Province in figures 2024*; BPS-Statistics Indonesia. (2024). *West Java Province in figures 2024*.



PETA JALAN IMPLEMENTASI BERTAHAP



Gambar 4.39: Peta jalan implementasi pemanfaatan langsung panas bumi yang diusulkan untuk Indonesia. Sumber: Para penulis.

hingga empat kali lipat pada 2050 dan dapat dipenuhi dengan teknologi pompa kalor residensial dan industri yang telah matang. Wilayah pengembangan yang paling potensial berada di Jawa Barat, Jawa Timur, dan Jawa Tengah.

- Agroindustri menjadi prioritas kedua yang kuat. Sektor pertanian dan peternakan memiliki kebutuhan pemanasan hingga 150°C yang berada dalam jangkauan teknologi pompa kalor industri saat ini. Provinsi yang paling menjanjikan untuk instalasi meliputi Riau, Jawa Tengah, Jambi, Sumatra Selatan, dan Jawa Timur.

- Tersedia jalur komersialisasi yang telah terbukti di sektor pertanian. Proyek tanggung jawab sosial perusahaan yang berhasil seperti pengolahan kopi di Kamojang dan pengolahan gula aren di Lahendong telah menunjukkan potensi untuk berkembang menjadi usaha komersial penuh. Model ini merupakan pendekatan yang layak untuk memulai proyek panas bumi baru di sektor pertanian.

Peta Jalan Implementasi Bertahap

Untuk menerjemahkan peluang tersebut menjadi kenyataan tujuan utamanya adalah memulai dengan proyek yang terarah membuktikan kelayakannya kemudian memperluas penerapannya secara nasional. Seluruh proses ini diperkirakan memerlukan waktu sekitar tujuh tahun (lihat **Gambar 4.39**).

Tahap 1 Proyek Percontohan

Pembangunan fasilitas percontohan di lokasi prioritas tertinggi bertujuan mengujikelayakanteknisdanekonomi dalam kondisi nyata. Tahap ini mencakup studi lokasi secara rinci pembangunan fasilitas serta masa operasi selama satu hingga tiga tahun untuk mengumpulkan data penting terkait kinerja biaya dan keandalan. Fokus utama perlu diarahkan pada pembuktian penggunaan sistem pompa kalor untuk pendinginan kawasan (lihat **Gambar 4.40** untuk contoh penyaringan pendahuluan untuk proyek-proyek percontohan) serta eksplorasi pemanfaatan panas sisa dari pembangkit listrik panas bumi yang telah beroperasi melalui sistem berjenjang.

Tahap 2 Evaluasi dan Penguatan Kebijakan

Setelah tahap percontohan selesai hasilnya perlu dievaluasi secara menyeluruh agar pimpinan pemerintah perusahaan utilitas operator panas bumi serta masyarakat dan pemangku kepentingan lokal memahami manfaat tantangan serta pelajaran yang diperoleh. Temuan ini kemudian dapat digunakan sebagai dasar penyusunan rekomendasi kebijakan dan regulasi yang memungkinkan adopsi yang lebih luas serta menyederhanakan pengembangan proyek di masa depan.

Tahap 3 Perluasan Skala Nasional

Dengan selesainya proyek percontohan yang berhasil dan tersedianya kebijakan pendukung tahap akhir adalah penerapan secara luas. Pengetahuan yang diperoleh dari proyek percontohan perlu dimanfaatkan untuk melakukan studi kelayakan di lokasi dan sektor baru sehingga mendorong perluasan pemanfaatan langsung panas bumi di tingkat nasional.

PERBANDINGAN TIGA LOKASI PENDINGINAN PANAS BUMI PRIORITAS TINGGI

Parameter	Satuan	Jakarta, DKI Jakarta	Bekasi, West Java	Yogyakarta, DI Yogyakarta
Penduduk*	Jumlah orang	10,672,100	3,172,833	4,073,907
Luas*	km^2	660.98	213.12	3,185.80
Kepadatan penduduk*	Jumlah orang/km^2	16,145.87	14,887.54	1,278.77
Suhu udara rata-rata*	°C	27.2	26.5	26.2
Kelembapan rata-rata*	%	74.4	80.2	80
Penggunaan Lahan*				
• Kawasan industri	km^2	6.8	69	2.5
• Hotel	Unit	549	19	1,924
• Gedung Bertingkat	Unit	149	24	127
Kebutuhan pendinginan		Dominan untuk kebutuhan gedung bertingkat	Dominan untuk kebutuhan kawasan industri	Dominan untuk kebutuhan fasilitas perhotelan

Gambar 4.40: Contoh hasil penyaringan awal yang merangkum aspek demografi suhu rata rata kelembapan udara rata rata serta kebutuhan pendinginan pada tiga lokasi prioritas tinggi untuk proyek percontohan pendinginan panas bumi dengan berbagai jenis pendekatan. Tanda bintang menunjukkan bahwa data demografi suhu rata-rata dan tingkat kelembapan merupakan data tahunan tahun 2023 yang bersumber dari laman resmi Badan Pusat Statistik masing masing wilayah. Sumber: BPS. (2024). *DKI Jakarta Province in figures 2024*; BPS. (2024). *Bekasi City in figures 2024*; BPS. (2024). *Yogyakarta City in figures 2024*.

INFORMASI TAMBAHAN SUMBER DATA

Figures 4.12, 4.14, and 4.15 sources: BPS-Statistics Indonesia. (2025). *Estates production by crops, Indonesia (thousand tons), 2024*. Hongyou, L., de la Rue du Can, S., Letschert, V. E., Wong, H. LC, Zhou, N., Wijaya, F., Hidayati, F., & Husodo, D. C. (2024). *Industry decarbonization roadmaps for Indonesia: Opportunities and challenges to net-zero emissions*. Energy Technologies Area, Berkeley Lab; PT Emdeki Utama Tbk. (2023). *Annual report and sustainability report 2023*; Rehfeldt, M., Fleiter, T., & Toro, F. (2018). A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry. *Energy Efficiency*, *11*, 1057–1082.

Figure 4.22

Asahimas Flat Glass. (2024). *Annual report 2023*. PT Asahimas Flat Glass Tbk.

BN Nasional. (2024, July 18). *Throughout 2023, Inalum will produce 215,000 tons of aluminum*.

BPS. (2021). *2020 national census*. Government of Indonesia.

BPS. (2023). *Indonesian population projection 2020-2050: Results of the 2020 population census*. Government of Indonesia.

BPS. (2024). *Indonesia coffee statistics*. Government of Indonesia.

BPS. (2024). *Indonesia tea statistics*. Government of Indonesia.

BPS. (2024). *Statistics of forestry production 2023*. Government of Indonesia.

BPS. (2025). *Production of mineral mining commodities, 2021–2023*. Government of Indonesia.

BPS. (2025). *Annual production of large estates by crop type (thousand tons), 2022–2023*. Government of Indonesia.

BPS. (2025). *Statistical yearbook of Indonesia*. Government of Indonesia.

BPS. (2025). *Production volume of mining materials (cubic meters), 2021–2023*. Government of Indonesia.

Chandra Asri. (2024). *Chandra Asri annual report 2023: Transformation through partnerships for growth*. PT Chandra Asri Pacific Tbk.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025). *Forestry production and trade*. FAOSTAT.

Foreign Agricultural Service. (2024). *Dairy and products annual*. United States Department of Agriculture.

House of Representatives of the Republic of Indonesia. (2016). *Academic manuscript of the Tobacco Bill*. Government of Indonesia.

House of Representatives of the Republic of Indonesia. (2024). *Academic manuscript of the Textile Bill*. Government of Indonesia.

HUMI. (2024). *Annual public exposé: Fiscal year 2024*. PT Humpuss Maritime International, Inc. (HUMI).

ICN Bureau. (2023, May 25). *Nippon Shokubai inaugurates new acrylic acid plant in Indonesia*. Indian Chemical News.

IEA Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies (HPT TCP). (2023). *Greensteam high temperature heat pump: Futraheat*. International Energy Agency (IEA).

International Energy Agency (IEA). (2022). *The future of heat pumps*. IEA.

Lu, H., de la Rue du Can, S., Letschert, V. E., Wong, H. LC, Zhou, N., Wijaya, F., Hidayati, F., & Husodo, D. C. (2024). *Industry decarbonization roadmaps for Indonesia: Opportunities and challenges to net-zero emissions*. Lawrence Berkeley National Laboratory.

MDQ Karbit. (2024). *Public exposé of PT Emdeki Utama Tbk Gresik, December 9, 2024*. PT Emdeki Utama Tbk.

Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Indonesia's National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. Government of Indonesia.

Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2024). *Oil and gas statistics, first semester 2024*. Government of Indonesia.

National Minerals Information Center. (2024). *Mineral commodity summaries 2024*. United States Geological Survey.

Rehfeldt, M., Fleiter, T., & Toro, F. (2017). A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry. *Energy Efficiency*, *11*, 1057–1082.

The Global Economy.com. (2025). *Indonesia: Zinc production*.

LAMPIRAN 1

Metodologi Rinci untuk Pengumpulan dan Analisis Data Permintaan Energi Termal

Laporan ini menggunakan pendekatan berbasis proses untuk menganalisis perbedaan kebutuhan energi termal per satuan produk yang dikenal sebagai intensitas energi pemanasan proses ketika komoditas yang sama diproduksi dengan teknologi yang berbeda. Sementara itu, aplikasi termal pada sektor penggunaan akhir pendinginan penyimpanan dingin serta heating ventilation and air conditioning atau HVAC dibagi lebih lanjut berdasarkan jenis peralatan. Secara keseluruhan, terdapat 15 jenis peralatan yang dianalisis pada sektor sektor penggunaan akhir tersebut.[58]

Permintaan energi termal nasional dikuantifikasi dalam satuan terajoule berdasarkan konsep dasar perkalian antara intensitas energi termal untuk pemanasan atau pendinginan dengan jumlah produk atau peralatan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 1. Selain itu penghitungan permintaan energi termal Indonesia memerlukan sejumlah data dan asumsi yang harus dikumpulkan dan dianalisis sebagaimana dirangkum dalam Indonesia National Cooling Action Plan. Persamaan 2 menunjukkan perhitungan permintaan pendinginan nasional tahunan untuk sektor pendinginan penyimpanan dingin dan HVAC.

Persamaan 1

Permintaan pemanasan proses tahunan (TJ)
= jumlah produksi tahunan (ton) × unit heat input (TJ/ton)

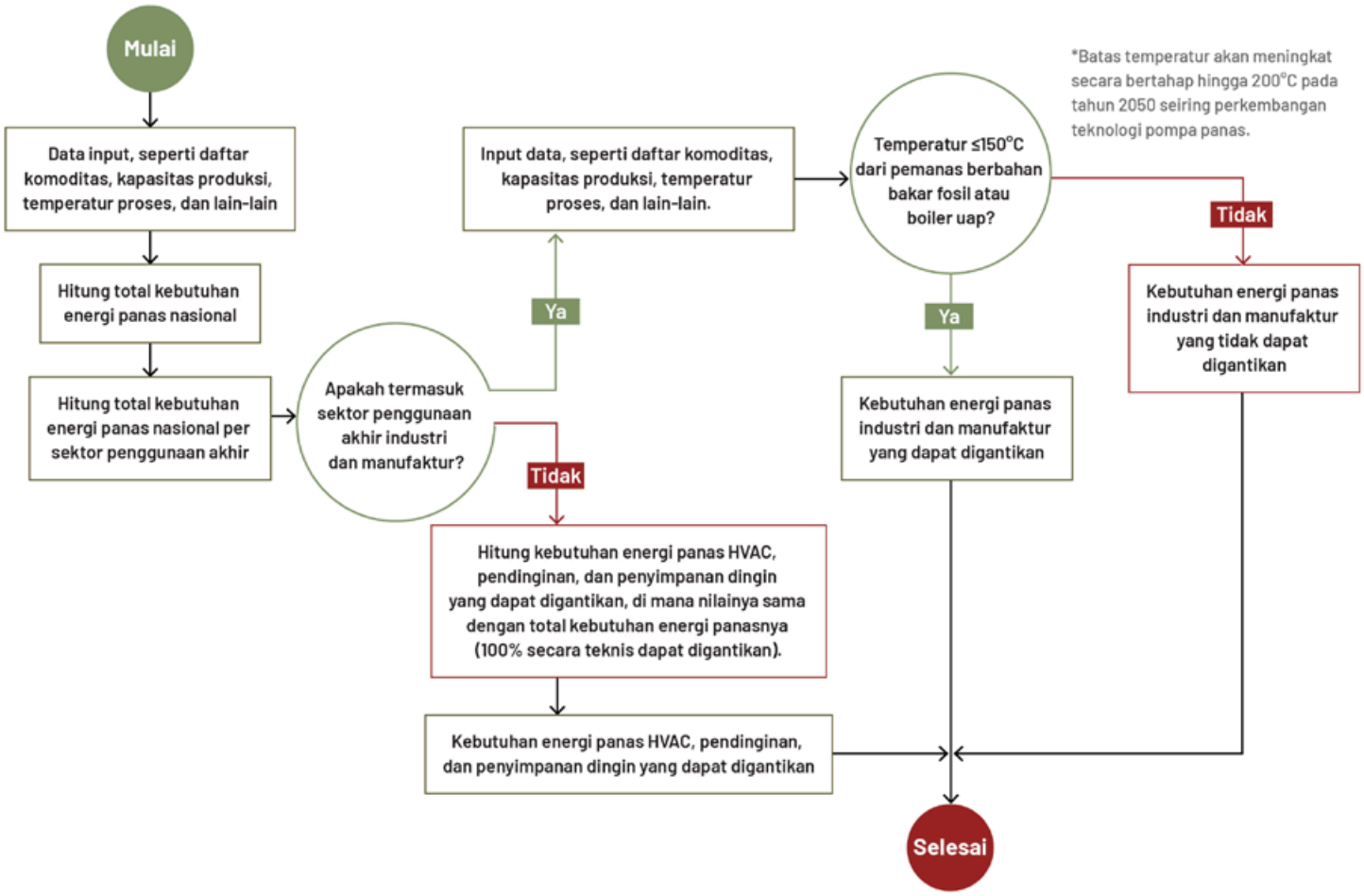
Persamaan 2

Permintaan pendinginan tahunan untuk pendinginan penyimpanan dingin dan HVAC (TJ)
= apasitas unit (TW_{th} per unit) × jumlah peralatan tahunan (unit)
× faktor pemanfaatan (%) × waktu operasi tahunan (hours) × 3600

Studi ini memperkirakan porsi permintaan energi termal Indonesia yang secara teknis dapat digantikan oleh pemanfaatan langsung panas bumi yaitu panas yang saat ini dipasok oleh pemanas atau boiler berbahan bakar fosil pada rentang suhu yang dapat dicapai oleh teknologi panas bumi komersial (**Gambar 4.42**). Metodologi yang digunakan untuk penilaian ini diuraikan **Gambar 4.41**. Pompa kalor komersial yang tersedia saat ini mampu menghasilkan suhu hingga 150°C, engan proyeksi mencapai 200°C pada 2050,[59] sehingga menunjukkan bahwa proses industri bersuhu tinggi pun berpotensi didekarbonisasi melalui panas bumi di masa depan. Namun implementasi aktual tetap bergantung pada faktor kelayakan di luar suhu seperti biaya akses lokasi dan integrasi sistem energi.

Meskipun uap panas bumi, fluida reinjeksi atau sumur tidak aktif dapat menyediakan panas hingga 200°C,[60] sumber sumber tersebut bersifat spesifik lokasi dan terbatas pada wilayah yang memiliki lapangan panas bumi aktif. Oleh karena itu, analisis ini berfokus pada aplikasi pompa kalor yang memperluas potensi pemanfaatan langsung panas bumi melampaui sistem konvensional. Pompa kalor dapat beroperasi dengan suhu bawah permukaan serendah

CARA MENGHITUNG KEBUTUHAN ENERGI PANAS YANG SECARA TEKNIS DAPAT DIGANTIKAN OLEH PANAS BUMI



Gambar 4.41: Alur kerja sederhana yang digunakan untuk menghitung permintaan energi termal yang secara teknis dapat digantikan oleh pemanaatan langsung panas bumi. Sumber: International Energy Agency (IEA). (2022). *The future of heat pumps*.

TEKNOLOGI BERBASIS PANAS BUMI UNTUK MENGGANTIKAN KEBUTUHAN ENERGI PANAS

Sektor Penggunaan Akhir	Temperatur Keluaran yang Dibutuhkan	Teknologi Pengganti Kebutuhan Energi Panas	Kapasitas Temperatur Keluaran untuk Teknologi Komersial	Sumber/Pelepas Panas Minimum yang Dibutuhkan (Temperatur)	Sumber
Proses pemanasan industri dan manufaktur	15°C hingga >1.000°C	Pompa panas industri yang digerakkan oleh panas bumi sistem sirkuit tertutup (closed-loop geothermal)	Saat ini: hingga 100°C 2030: hingga 150°C 2040: hingga 200°C	Sumber panas: 25°C untuk keluaran >100°C 70°C untuk keluaran >100°C–150°C 150°C untuk keluaran >200°C	IEA, 2022
Pendinginan dan penyimpanan dingin	Dari 15°C hingga tingkat pembekuan	Pendingin absorpsi berbasis campuran amonia/air yang digerakkan oleh panas bumi sistem sirkuit tertutup	-60°C hingga 25°C	Sumber panas: 80°C	Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2024
Penggunaan perumahan dan komersial HVAC	15°C–25°C	Pompa panas yang digerakkan oleh panas bumi sistem sirkuit tertutup (ground source heat pump)	15°C hingga 25°C	Pelepas panas (heat sink): 25°C	Paul & Kumar, 2025

Gambar 4.42: Asumsi teknologi berbasis panas bumi yang sesuai untuk menggantikan permintaan energi termal melalui pemanfaatan langsung panas bumi. Sumber: International Energy Agency (IEA). (2022). *The future of heat pumps*. IEA; Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (2024). *CHP technologies: Absorption chillers* [Combined Heat and Power Technology Fact Sheet series]. U.S. Department of Energy; Paul, S. D., & Kumar, K. R. (2025). *Advancements in adsorption bed for cooling applications: A comprehensive review of configurations and operating parameters*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *211*, 115301.

20°C–25°C untuk menyediakan panas proses hingga 75°C[61] atau mendukung sistem HVAC residensial dan komersial dengan suhu pendinginan antara 15°C–25°C.[62] Kebutuhan panas yang lebih tinggi (seperti 150°C) dapat memerlukan suhu bawah permukaan sekitar 70°C, yang dapat dicapai pada kedalaman sekitar 1.5 kilometers di wilayah dengan gradien panas bumi yang tinggi.[63] Ini merupakan karakteristik umum di banyak wilayah Indonesia. Hal ini menunjukkan bahwa pompa kalor menawarkan jalur yang layak dan dapat ditingkatkan skalanya untuk memperluas pemanfaatan langsung panas bumi di seluruh kepulauan Indonesia.

Untuk sektor pendinginan penyimpanan dingin dan HVAC, permintaan energi termal yang dapat digantikan diasumsikan setara dengan seluruh permintaan pendinginan. Asumsi ini didasarkan pada kemampuan teknologi pendinginan komersial yang tersedia untuk memenuhi seluruh rentang suhu pendinginan seperti pompa kalor sumber tanah untuk keluaran pendingin udara pada 15°C dan 25°C chiller absorpsi berbasis campuran amonia air untuk keluaran pendinginan dari 10°C hingga mencapai titik beku.[64] Formulasi untuk menghitung permintaan energi termal yang dapat digantikan disajikan pada Persamaan 3 dan Persamaan 4.

Persamaan 3

Permintaan pemanasan proses yang dapat digantikan (TJ) = masukan panas dari pembakaran bahan bakar atau uap (TJ) × proporsi masukan panas pada suhu proses yang dapat dicapai oleh pompa kalor industri komersial (%)

Persemaan 4

Permintaan pendinginan, penyimpanan dingin, dan HVAC yang dapat digantikan (TJ) = permintaan pendinginan penyimpanan dingin dan HVAC (TJ)

DATA DAN ASUMSI PEMANASAN PROSES INDUSTRI DAN MANUFAKTUR

Parameter Dasar Pemanasan Proses Tahun 2023

Industri Sasaran	Proses	Produksi Industri		Kebutuhan Panas Proses berdasarkan Jenis Pemanas						Porsi Kebutuhan Panas Proses berdasarkan Rentang Suhu							
		Jumlah (ton)	Sumber	Bahan bakar langsung a (TJ/ ton)	Uapa (TJ/ ton)	Listrik bruto a (TJ/ ton)	Porsi listrik untuk pema-nasan proses	Listrik bersih b (TJ/ ton)	Sumber	>15°C–75°C	>75°C – 100°C	>100°C – 150°C	>150°C – 200°C	>200°C – 500°C	>500 – 1000°C	>1000°C	Sumber
Mineral Non Logam	Manufaktur semen kalsinasi klinker kering	62,000, 000	Lu et al., 2024	3.6	-	0.14	0%	0.00	Lu et al., 2024; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	10%	60%	30%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Mineral Non Logam	Manufaktur kapur	17,822 329	BPS, 2025c	3.7	-	0.14	0%	0.00	Korczak et al., 2022; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	40%	60%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Mineral Non Logam	Manufaktur kaca datar	1,261 463	Asahi-mas Flat Glass, 2024	19.2	-	3.32	0%	0.00	Korczak et al., 2022; Rehfeldt et al., 2017	-	2%	11%	11%	43%	12%	22%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Industri Kimia	Manufaktur amonia gas sintesis	5,800 000	USGS, 2024; Lu et al., 2024	37.0	-	0.48	0%	0.00	Lu et al., 2024; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	67%	33%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Industri Kimia	Manufaktur etilena	743, 000	Chan-dra Asri, 2024	35.9	-	0.00	0%	0.00	Thiel & Stark, 2021; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	100%	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Industri Kimia	Manufaktur metanol gas sintesis	660, 000	HUMI, 2024	7.5	7.5	0.49	0%	0.00	Thiel & Stark, 2021; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	22%	78%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Industri Kimia	Manufaktur polietilena	650, 000	Chan-dra Asri, 2024	-	0.6	2.04	0%	0.00	Thiel & Stark, 2021; Rehfeldt et al., 2017	-	-	50%	50%	-	-	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Industri Kimia	Manufaktur polipropile-na	517, 000	Chan-dra Asri, 2024	-	0.8	1.15	0%	0.00	Thiel & Stark, 2021; Rehfeldt et al., 2017	-	-	50%	50%	-	-	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Industri Kimia	Manufaktur Akrilik	110, 231	ICN, 2023	-	0.0 0418	-	-	-	Turton, 2018	-	-	-	50%	50%	-	-	Turton, 2018)
Industri Kimia	Manufaktur Kalsium Karbida	20,647	MDQ Karbit, 2024	6.1	-	8.32	95%	7.90	Thiel & Stark, 2021; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	-	100%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017



Industri Sasaran	Proses	Produksi Industri		Kebutuhan Panas Proses berdasarkan Jenis Pemanas						Porsi Kebutuhan Panas Proses berdasarkan Rentang Suhu							
		Jumlah (ton)	Sumber	Bahan bakar langsung a (TJ/ ton)	Uapa (TJ/ ton)	Listrik bruto a (TJ/ ton)	Porsi listrik untuk pema-nasan proses	Listrik bersih b (TJ/ ton)	Sumber	>15°C–75°C	>75°C – 100°C	>100°C – 150°C	>150°C – 200°C	>200°C – 500°C	>500 – 1000°C	>1000°C	Sumber
Pulp dan Kertas	Pembuatan kertas mekanik	1,765, 755	FAO, 2025; Lu et al., 2024	-	1.2	7.92	1%	0.08	Lu et al., 2024; Rehfeldt et al., 2017	50%	50%	-	-	-	-	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Pulp dan Kertas	Pembuatan kertas kimia	15,891, 794	FAO, 2025; Lu et al., 2024	-	12.7	2.30	1%	0.02	Lu et al., 2024; Rehfeldt et al., 2017	-	-	50%	50%	-	-	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Logam Dasar	Besi dan baja tanur tinggi	6,460, 000	World Steel Asso-cia-tion, 2025; Lu et al., 2024	20.0	-	0.60	0%	0.00	Lu et al., 2024; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	3%	20%	77%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Logam Dasar	Besi dan baja tanur listrik	10, 540, 000	World Steel Asso-cia-tion, 2025; Lu et al., 2024	-	-	2.28	95%	2.17	Lu et al., 2024; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	10%	90%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Logam Dasar	Manufaktur tembaga	3,999, 565	BPS, 2025b	8.0	-	2.79	20%	0.56	Dutta et al., 2022; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	-	100%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Logam Dasar	Manufaktur Alumunium	215, 000	BN Nasi-onal, 2024	5.2	-	53.64	5%	2.68	Dutta et al., 2022; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	100%	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Logam Dasar	Manufaktur Seng	18	The Global Econ omy. com, 2025	1.0	-	1.59	10%	0.16	Dutta et al., 2022; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	-	100%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Tekstil	Pencelupan, pence-takan, dan penyem-purnaan tekstil	1,837, 760	DPR RI, 2024	-	39.4	4.38	1%	0.04	Farhana et al., 2022; Lu et al., 2024	60%	40%	-	-	-	-	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Produk minyak bumi dan batu bara	Pengilan-gan minyak	34, 935, 150	MEMR, 2024b	0.2	-	-	-	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	100%	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017



Industri Sasaran	Proses	Produksi Industri		Kebutuhan Panas Proses berdasarkan Jenis Pemanas						Porsi Kebutuhan Panas Proses berdasarkan Rentang Suhu							
		Jumlah (ton)	Sumber	Bahan bakar langsung a (TJ/ton)	Uapa (TJ/ton)	Listrik bruto a (TJ/ton)	Porsi listrik untuk pemanasan proses	Listrik bersih b (TJ/ton)	Sumber	>15°C–75°C	>75°C – 100°C	>100°C – 150°C	>150°C – 200°C	>200°C – 500°C	>500 – 1000°C	>1000°C	Sumber
Produk minyak bumi dan batu bara	Manufaktur karbon hitam	130,000	Ardyansa, 2022	64.8	-	-	-	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017	-	-	-	-	-	-	100%	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Pertanian dan produk susu	Pengolahan susu	2,743,200	Foreign Agricultural Service, 2024	-	1.6	0.53	5%	0.03	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017	45%	45%	7%	3%	-	-	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Pertanian dan produk susu	Pengolahan tebu	869,030	BPS, 2025a	-	4.5	-	-	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017	5%	5%	30%	30%	0%	30%	-	Su et al., 2021; Rehfeldt et al., 2017
Pertanian dan produk susu	Pengolahan kopi	758,730	BPS, 2024a	-	0.0039	0.0004	100%	0.0004		90%	10%	-	-	-	-	-	(BPS, 2024a)
Pertanian dan produk susu	Pengolahan tembakau	272,175	BPS, 2025a; DPR RI, 2016	-	2.8	3.65	5%	0.18	Wismilak, 2024; Rehfeldt et al., 2017	-	-	40%	40%	20%	-	-	Cozzani, et al., 2020
Pertanian dan produk susu	Pengolahan teh	116,510	BPS, 2024b	-	0.00126	0.0036	50%	0.0018		90%	10%	-	-	-	-	-	BPS, 2024b
Pertanian dan produk susu	Pengolahan kayu	49,406,100	BPS, 2024c	-	0.00187	-	-	-	Meng et al., 2019; Carey, 2018	-	10%	80%	10%	-	-	-	Meng et al., 2019; Carey, 2018)
Pertanian dan produk susu	Pengolahan gula aren dan gula merah	156,124	BPS, 2025a	-	0.00015	-	-	-	Kurniawan et al., 2024	90%	10%	-	-	-	-	-	Kurniawan et al., 2024

Catatan:
a. Diasumsikan bahwa 100% energi digunakan untuk pemanasan proses dan tidak termasuk panas yang dihasilkan dari fasilitas kogenerasi.
b. Mencakup kebutuhan listrik untuk keperluan selain pemanasan proses, seperti peralatan pendukung proses dan bangunan.
c. Mencakup kebutuhan listrik yang digunakan khusus untuk pemanasan proses saja.
Catatan: - = 0%, berarti komoditas tersebut memerlukan 0% panas proses pada rentang suhu tersebut.

Gambar 4.43: Data dan asumsi pemanasan proses industri dan manufaktur.

PROYESKI PARAMETER PEMANASAN PROSES TAHUN 2050

Industri sasaran	Proses	Pertumbuhan linier produksi tahunan	Penurunan linier input panas tahunan (peningkatan efisiensi)	Sumber	Keterangan
Mineral non logam	Manufaktur semen melalui kalsinasi klinker kering	1.8%	0.7%	Lu et al., 2024	-
Mineral non logam	Manufaktur kapur	2.6%	2.1%	BPS, 2025c; IEA, n.d.	-
Mineral non logam	Manufaktur kaca lembaran	5.5%	2.1%	Asahimas Flat Glass, 2024; IEA, n.d.	-
Kimia	Manufaktur amonia untuk gas sintesis	0.6%	0.8%	USGS, 2024; Lu et al., 2024	-
Kimia	Manufaktur etilena	-1.7%	1.7%	Chandra Asri, 2024; CEIC, n.d.	Produksi periode 2020 sampai 2023 menunjukkan tren menurun.
Kimia	Manufaktur metanol untuk gas sintesis	6.4%	1.7%	HUMI, 2024; CEIC, n.d.	
Kimia	Manufaktur polietilena	-1.2%	1.7%	Chandra Asri, 2024; CEIC, n.d.	Produksi periode 2020 sampai 2023 menunjukkan tren menurun.
Kimia	Manufaktur polipropilena	-0.8%	1.7%	Chandra Asri, 2024; CEIC, n.d.	Produksi periode 2020 sampai 2023 menunjukkan tren menurun
Kimia	Manufaktur akrilik	2.9%	1.7%	ICN, 2023; CEIC, n.d.	
Kimia	Manufaktur kalsium karbida	1.2%	1.7%	MDQ Karbit, 2024; CEIC, n.d.	
Pulp dan kertas	Pembuatan kertas mekanis	24.8%	1.8%	FAO, 2025; Lu et al., 2024	
Pulp dan kertas	Pembuatan kertas kimia	1.4%	0.9%	FAO, 2025; Lu et al., 2024	Pangsa kertas kimia diperkirakan menurun dibandingkan kertas mekanis
Logam dasar	Pembuatan besi dan baja—Tanur tinggi (blast furnace)	-1.75%	0.5%	World Steel Association, 2025; Lu et al., 2024	Diperkirakan bahwa total pangsa baja yang diproduksi menggunakan tanur tiup (blast furnace) akan menurun di masa depan, berbeda dengan baja yang diproduksi menggunakan tanur listrik (electric furnace)
Logam dasar	Pembuatan besi dan baja—Tanur busur listrik (electric arc furnace)	6.2%	1.0%	World Steel Association, 2025; Lu et al., 2024	



Industri sasaran	Proses	Pertumbuhan linier produksi tahunan	Penurunan linier input panas tahunan (peningkatan efisiensi)	Sumber	Keterangan
Logam dasar	Manufaktur Tembaga	5.3%	2.1%	BPS, 2025b; IEA, n.d.	
Logam dasar	Manufaktur Alumunium	3.0%	2.1%	BN Nasional, 2024; IEA, n.d.	
Logam dasar	Manufaktur Seng	-1.4%	2.1%	The Global Economy.com, 2025; IEA, n.d.	Produksi periode 2020 sampai 2023 menunjukkan tren menurun
Tekstil	Pencelupan, pencetakan, dan penyempurnaan tekstil	6.7%	1.6%	DPR RI, 2024; IEA, n.d.	
Produk minyak bumi dan batu bara	Pengilangan minyak	1.2%	2.1%	MEMR, 2024b; IEA, n.d.	
Produk minyak bumi dan batu bara	Manufaktur karbon hitam	6.3%	2.1%	Ardyansa, 2022; IEA, n.d.	
Pertanian dan susu	Pengolahan susu	9.7%	2.1%	Foreign Agricultural Service, 2024; IEA, n.d.	
Pertanian dan susu	Pengolahan tebu	9.4%	2.1%	BPS, 2025a; IEA, n.d.	
Pertanian dan susu	Pengolahan kopi	1.0%	2.1%	BPS, 2024a; IEA, n.d.	
Pertanian dan susu	Pengolahan tembakau	2.8%	2.1%	BPS, 2025a; DPR RI, 2016	
Pertanian dan susu	Pengolahan teh	0.4%	2.1%	BPS, 2024b; IEA, n.d.	
Pertanian dan susu	Pengolahan kayu	18.3%	2.1%	BPS, 2024c; IEA, n.d.	
Pertanian dan susu	Pengolahan gula aren dan gula merah	3.6%	2.1%	BPS, 2025a; IEA, n.d.	

Gambar 4.44: Proyeski parameter pemanasan proses tahun 2050

SUMBER VERSI LENGKAP

Ardyansa, N. J. (2022). *Preliminary design of a carbon black plant from decant oil and air using the oil furnace process* [Bachelor's thesis]. National Development University "Veteran" of East Java. https://repository.upnjatim.ac.id/9221/

Asahimas Flat Glass. (2024). *Annual report 2023*. PT Asahimas Flat Glass Tbk.

BN Nasional. (2024, July 18). *Through 2023, Inalum will produce 215,000 tons of alumninum*. https://bnnasional.com/sepanjang-tahun-2023-inalum-produksi-215-ribu-ton-aluminium/#:~:text=Sepanjang%20Tahun%202023%2C%20Inalum%20Produksi%20215%20Ribu%20Ton%20Aluminium,-admin%2018%2

BPS. (2024a). *Indonesia coffee statistics*. Statistics Indonesia (BPS). https://www.bps.go.id/en/publication/2024/11/29/d748d9bf594118fe112fc51e/indonesian-coffee-statistics-2023.html

BPS. (2024b). *Indonesia tea statistics*. Statistics Indonesia (BPS). https://www.bps.go.id/id/publication/2024/11/29/04f3ce433a368afa83384b7a/indonesian-tea-statistics-2023.html

BPS. (2024c). *Statistics of forestry production 2023*. Statistics Indonesia (BPS). https://www.bps.go.id/en/publication/2024/07/26/3a38028576970e086c1cf32f/statistics-of-forestry-production-2023.html

BPS. (2025a). *Annual production of large estates by crop type (thousand tons), 2022–2023*. Statistics Indonesia (BPS). https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/OTQjMg==/produksi-perkebunan-besar-menurut-jenis-tanaman—ton-.html

BPS. (2025b). *Production of mineral mining commodities, 2021–2023*. Statistics Indonesia (BPS). https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NTA4IzI=/produksi-barang-tambang-mineral.html

BPS. (2025c). *Production volume of mining materials (cubic meters), 2021–2023*. Statistics Indonesia (BPS). https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NTEwIzI=/volume-produksi-pertambangan-bahan-galian.html

BPS. (2025d). *Statistical yearbook of Indonesia. Statistics Indonesia (BPS)*. https://www.bps.go.id/en/publication/2025/02/28/8cfe1a589ad3693396d3db9f/statistical-yearbook-of-indonesia-2025.html

Carey, B. (2018). *Using geothermal energy for kiln drying operations*. GNS Science.

CEIC. (n.d.). *Indonesia energy: Consumption: Industry and construction: Chemical industry: Electricity*. https://www.ceicdata.com/en/indonesia/energy-statistics-consumption/energy-consumption-industry—construction-chemical-industry-electricity?

Chandra Asri. (2024). *Chandra Asri annual report 2023: Transformation through partnerships for growth*. PT Chandra Asri Pacific Tbk.

Cozzani, V., Barontini, F., McGrath, T., Mahler, B., Nordlund, M., Smith, M., Schaller, J. P., & Zuber, G. (2020). An experimental investigation into the operation of an electrically heated tobacco system. *Thermochimica Acta, 684*, 178475. https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.178475

DPR RI (House of Representatives of the Republic of Indonesia). (2016). *Academic manuscript of the Tobacco bill*. DPR RI.

DPR RI (House of Representatives of the Republic of Indonesia). (2024). *Academic manuscript of the Textile Bill*. DPR RI.

Dutta, S. K., Saxena, J., & Choudhury, B. K. (2022). *Energy efficiency and conservation in metal industries with selected cases of investment grade audi*t. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003157137

Farhana, K., Kadirgama, K., Mahamude, A. S. F., & Mica, M. T. (2022). Energy consumption, environmental impact, and implementation of renewable energy resources in global textile industries: An overview towards circularity and sustainability. *Materials Circular Economy, 4*, 15. https://doi.org/10.1007/s42824-022-00059-1

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025). *Forestry production and trade* [Data set]. FAOSTAT. https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO

Foreign Agricultural Service. (2024). *Dairy and products annual*. U.S. Department of Agriculture.

The Global Economy.com. (2025). *Indonesia: Zinc production*. https://www.theglobaleconomy.com/Indonesia/zinc_production/

HUMI. (2024). *Annual public exposé: Fiscal year 2024*. PT Humpuss Maritim Internasional Tbk (HUMI).

ICN Bureau. (2023, May 25). *Nippon Shokubai inaugurates new acrylic acid plant in Indonesia*. Indian Chemical News. https://www.indianchemicalnews.com/petro-chemical/nippon-shokubai-inaugurates-new-acrylic-acid-plant-in-indonesia-17601#:~:text=recently%20announced%20that%20its%20subsidiary,200%20million%20US%20dollars

IEA (International Energy Agency). (n.d.). *Energy system of Indonesia*. https://www.iea.org/countries/indonesia

Korczak, K., Kochański, M., & Skoczkowski, T. (2022). Mitigation options for decarbonization of the non-metallic minerals industry and their impacts on costs, energy consumption and GHG emissions in the EU: Systematic literature review. *Journal of Cleaner Production, 358*, 132006. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132006

Kurniawan, M. P., Maharani, A. D., Pradita, S. P., Nurramdhana, A. D., Gunawan, C. A., & Larasati, E. A. (2024). Analysis of energy and material efficiency in traditional sugar mills using STEM-based approaches. *Jurnal Ilmiah Inovasi, 24*(3).

Lu, H., de la Rue du Can, S., Letschert, V. E., Wong, H. LC., Zhou, N., Wijaya, F., Hidayati, F., & Husodo, D. C. (2024). *Industry decarbonization roadmaps for Indonesia: Opportunities and challenges to net-zero emissions*. Lawrence Berkeley National Laboratory.

MDQ Karbit. (2024). *Public exposé of PT Emdeki Utama Tbk Gresik, December 9, 2024*. PT Emdeki Utama Tbk.

Meng, Y., Chen, G., Hong, G., Wang, M., Gao, J., & Chen, Y. (2019). Energy efficiency performance enhancement of industrial conventional wood drying kiln by adding forced ventilation and waste heat recovery system: A comparative study. *Maderas Ciencia y tecnología, 1*(4), 545–558.

Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2024a). *Indonesia's National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. Government of Indonesia.

Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2024b). *Oil and gas statistics, first semester 2024*. Government of Indonesia.

Rehfeldt, M., Fleiter, T., & Toro, F. (2017). A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry. *Energy Efficiency, 11*, 1057–1082. https://doi.org/10.1007/s12053-017-9571-y

Su, Z., Zhang, M., Xu, P., Zhao, Z., Wang, Z., Huang, H., & Ouyang, T. (2021). Opportunities and strategies for multigrade waste heat utilization in various industries: A recent review. *Energy Conversion and Management, 229*, 113769. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113769

Thiel, G. P., & Stark, A. K. (2021). To decarbonize industry, we must decarbonize heat. *Joule, 5*(3), P531–550. https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.12.007

Turton, R. (2018). *Acrylic acid process*. West Virginia University.

USGS (U.S. Geological Survey). (2024). *Mineral commodity summaries 2024*. USGS.

Wismilak. (2024). *Sustainability report 2023*. PT Wismilak Inti Makmur Tbk.

World Steel Association. (2025). *Total production of crude steel*. https://World Steel Association.org/data/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND



LAMPIRAN 2

Kode Klasifikasi Baku Lapangan Usaha Indonesia (KBLI) yang Memenuhi Syarat untuk Memperoleh Izin Usaha Pemanfaatan Langsung Panas Bumi

Kode KBLI	Judul KBLI	Deskripsi KBLI
01640	Seleksi Benih Tanaman untuk Pengembangan	Mencakup seluruh kegiatan pascapanen yang bertujuan meningkatkan kualitas benih melalui pemilahan dari bahan nonbenih benih berukuran terlalu kecil benih yang rusak secara mekanis benih yang rusak akibat serangga serta benih yang belum matang serta menjaga kadar air benih pada kondisi aman. Termasuk kegiatan penyimpanan benih. Aktivitas ini meliputi pengeringan, pembersihan, penyortiran dan kegiatan sejenis hingga benih dipasarkan. Pemeliharaan benih hasil modifikasi juga termasuk dalam kelompok ini.
10211	Industri Penggaraman dan Pengeringan Ikan	Mencakup usaha pengolahan dan pengawetan ikan melalui proses penggaraman atau pengeringan seperti ikan tembang asin, teri asin, dan ikan segar kering.
10291	Industri Penggaraman dan Pengeringan Biota Air Lainnya	Mencakup usaha pengolahan dan pengawetan krustasea moluska echinodermata dan biota air lainnya melalui proses penggaraman atau pengeringan seperti udang asin. cumi asin, udang kering, ubur-ubur asin, sotong asin, teripang kering, sotong kering, dan sejenisnya.
10313	Industri Pengolahan Susu Segar dan Krim	Mencakup pengawetan buah dan sayuran melalui proses pengeringan baik dalam bentuk kemasan maupun tidak seperti kismis, bawang merah, bawang putih, cabai kering, rebung kering, dan jamur kering. Termasuk industri keripik buah dan sayuran.
10510	Industri Pengolahan Susu Segar dan Krim	Mencakup industri pengolahan susu cair segar yang dipasteurisasi, disterilisasi, dihomogenisasi, dan atau dipanaskan ultra tinggi serta industri pengolahan krim dari susu cair segar melalui proses pasteurisasi, sterilisasi, dan homogenisasi dalam bentuk cair atau setengah cair serta produk sejenis lainnya.
10722	Industri Gula Merah	Mencakup usaha pembuatan gula merah dalam bentuk cetakan bubuk atau cair yang berbahan baku nira murni baik dari tebu maupun palma seperti aren kelapa dan sejenisnya.
10733	Industri Buah Manisan dan Sayuran Kering	Mencakup pengawetan buah dan sayuran baik berupa buah, biji, kulit buah, maupun bagian tanaman lainnya melalui proses pemanisan dan pengeringan baik dalam bentuk kemasan maupun tidak seperti manisan pala, mangga kering, sayuran dan buah kering lainnya.
10761	Industri Pengolahan Kopi	Mencakup usaha penyangraian penggilingan dan ekstraksi kopi menjadi berbagai bentuk produk bubuk atau cair seperti kopi sangrai, kopi bubuk, kopi instan, ekstrak kopi, dan esens kopi.
10763	Industri Pengolahan Teh	Mencakup usaha pengolahan daun teh menjadi produk teh. Termasuk kegiatan pencampuran teh dan mate serta industri ekstraksi dan pengolahan berbasis teh dan mate.
12091	Industri Pengeringan dan Pengolahan Tembakau	Mencakup usaha pengeringan daun tembakau melalui pengasapan atau metode lainnya termasuk usaha perajangan daun tembakau.



Kode KBLI	Judul KBLI	Deskripsi KBLI
15111	Industri Pengawetan Kulit	Mencakup pengawetan kulit yang berasal dari hewan besar, hewan kecil, reptil, ikan dan hewan lainnya baik melalui proses pengeringan penggaraman maupun pengasaman seperti kulit sapi, kerbau, domba kambing, buaya, ular, biawak, ikan pari, hiu, kakap, belut, dan kulit hewan lainnya.
16102	Industri Pengawetan Kayu	Mencakup pengawetan kayu melalui proses pengeringan perlakuan kimia serta perendaman kayu dengan bahan pengawet atau bahan lainnya.
17011	Industri Kertas (Pulp)	Mencakup usaha pembuatan pulp dari kayu atau serat lainnya dan atau kertas bekas. Kegiatannya meliputi industri pulp yang diputihkan sebagian diputihkan atau tidak diputihkan melalui proses mekanis kimia atau semikimia termasuk pulp dari serat kapas serta industri penghilangan tinta dan pulp dari kertas bekas.
20294	Industri Minyak Atsiri	Mencakup usaha pembuatan minyak atsiri seperti minyak jahe, minyak kenanga, minyak ketumbar, minyak cengkeh, minyak kapulaga, minyak pala, minyak melati, minyak kenanga, minyak mawar, minyak akar wangi, minyak serai, minyak nilam, minyak cendana, minyak kayu putih, minyak kayu manis, minyak rempah, minyak jarak, serta minyak dari rumput semak daun dan kayu yang tidak termasuk dalam kelompok lainnya.
93221	Pemandian Alam / Pemandian Air Panas / Air Terjun	Mencakup usaha penyediaan tempat dan fasilitas pemandian dengan menggunakan air panas dan atau air terjun sebagai kegiatan utama serta dapat dilengkapi dengan penyediaan jasa makanan dan minuman serta akomodasi.
93231	Agrowisata	Mencakup usaha pengelolaan daya tarik wisata dengan memanfaatkan kawasan pertanian yang meliputi tanaman pangan hortikultura, perkebunan, perikanan, dan peternakan sebagai kegiatan utama serta dapat dilengkapi dengan berbagai fasilitas termasuk jasa makanan minuman dan akomodasi. Kegiatan meliputi produksi pengumpulan konservasi pengolahan serta aktivitas budaya masyarakat.

Sumber: BPS. (n.d.). *Indonesian Standard Classification of Business Fields (KBLI) 2020*.

REFERENSI

1 Al Asy'ari, M. R., Adityatama, D. W., Brilian, V. A., Erichatama, N., & Purba, D. (2024). Beyond electricity: Geothermal direct use business models and potential applications in Indonesia. In *Proceedings of the 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.* Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2024/Al.pdf&sa=D&source=docs&ust=1763046407379240&usg=AOvVaw1W9VRcWJQbGR6Kb8lVg9e3

2 Bagaskara, A., Al Asy'ari, R. M., Adityatama, D. W., Purba, D., Ahmad, A. H., Pratama, A. R., Banjarnahor, N. E., & Mukti, A. W. (2023). Exploring new ideas to promote and improve geothermal direct use in Indonesia. In *Proceedings, 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.* Stanford, CA, United States.

3 Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, *90*, 101915. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915

4 Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). (2022). *Direct utilization of geothermal resources*. World Bank. https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/16103-WB_ESMAP%20Direct%20Use-WEB.pdf

5 Lund, J., Huttrer, G., & Toth, A. (2023). Geothermal development and use, 1995–2023. In *GRC Transactions* (Vol. 48). Geothermal Rising Conference.

6 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Policy plan for direct utilization of geothermal energy in Indonesia.* Government of Indonesia.

7 Lund, J. W., Huttrer, G. W., & Toth, A. N. (2024). Geothermal development and use, 1995–2024. *Geothermal Resources Council Transactions*, *48*, 2496–2507. https://www.geothermal-library.org/index.php?mode=pubs&action=view&record=1035162

8 Lund et al., 2024.

9 Lund et al., 2024.

10 Richter, A. (2023). *Talk #1 – Low enthalpy geothermal: An attempt to positioning* [YouTube video]. SPE Europe Energy GeoHackathon. https://www.youtube.com/watch?v=Ujx5SlQeHUs&utm_source=chatgpt.com

11 Richter, 2023.

12 World Bank. (2025, March 26). *World Bank and El Salvador promote geothermal energy for sustainable and inclusive development* [Press release]. https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/03/26/banco-mundial-el-salvador-impulsan-energia-geotermica-desarrollo-sostenible-inclusivo

13 Cariaga, C. (2025, March 31). *World Bank announces $150 million investment for geothermal in El Salvador.* ThinkGeoEnergy. https://www.thinkgeoenergy.com/world-bank-announces-150-million-investment-for-geothermal-in-el-salvador/

14 Darma et al. (2021). Country update: The fast growth of geothermal energy development in Indonesia. In *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland.

15 Al Asy'ari et al., 2024.

16 Education Gazette editors. (2023, October 27). Curious minds drill to the core of geothermal Aotearoa. *Education Gazette*, *102*, 14. https://gazette.education.govt.nz/articles/curious-minds-drill-to-the-core-of-geothermal-aotearoa/

17 Anugrah, A. N. M., Hastuti, S. W., Nafista, K., Ilham, A. K., & Nandiwardhana, D. (2021). A review: Study of potential direct use geothermal in Indonesia. In *Proceedings of the 10th ITB International Geothermal Workshop 2021.* Bandung, Indonesia. https://www.researchgate.net/publication/366093887_A_Review_Study_of_Potential_Direct_Use_Geothermal_in_Indonesia

18 Utomo, G. P., & Muslim, D. (2021). Preliminary characterization of thermal waters for direct-use application in Indonesia: Case study Dieng. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavík, Iceland. https://www.worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/28047.pdf

19 Taqwim, S., Saptadji, N., & Ashat, A. (2013). Measuring the potential benefits of geothermal cooling and heating applications in Indonesia. In *Proceedings of the 13th Indonesia International GEOTHERMAL Convention & Exhibition 2013*. Jakarta, Indonesia.

20 Global Economy. (2025). *Primary energy consumption—Country rankings*. https://www.theglobaleconomy.com/rankings/prime_energy_consumption/

21 National Energy Council. (2024). *National energy balance analysis book*. Government of Indonesia. https://den.go.id/publikasi/Neraca-Energi

22 National Energy Council, 2024.

23 McNeil, M. A., Karali, N., & Letschert, V. (2019). Forecasting Indonesia's electricity load through 2030 and peak demand. *Energy for Sustainable Development*, *49*, 65–77. https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/forecasting_indonesias_electricity_load.pdf

24 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Handbook of energy and economic statistics of Indonesia 2023*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-and-economic-statistics-of-indonesia-2023.pdf

25 Pemerintah Indonesia hingga saat ini belum merilis pembaruan rincian penggunaan energi berdasarkan jenis aplikasi untuk sektor rumah tangga dan komersial.

26 McNeil et al., 2019.

27 McNeil et al., 2019.

28 Tidak ada data tambahan yang tersedia, karena pemerintah baru menerbitkan rincian hingga tahun 2020. Untuk standarisasi, kita dapat menerapkan proyeksi berdasarkan estimasi pertumbuhan pemerintah. Namun, penting untuk dicatat bahwa proyeksi ini mungkin tidak secara akurat mencerminkan situasi aktual.

29 Palladium. (2023). *Commercial sector NZE calculator 2023*. Mentari. https://nzecalculator.mentari.info/documents/demand-sector-commercial.pdf

30 International Energy Agency (IEA). (2022). *The future of heat pumps*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/4713780d-c0ae-4686-8c9b-29e782452695/TheFutureofHeatPumps.pdf

31 Seluruh data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) awalnya dilaporkan dalam satuan terawatt-hour (TWh). Untuk memperjelas analisis kebutuhan energi panas lintas sektor, kajian ini menggunakan satuan terajoule (TJ), yang merupakan satuan baku untuk energi panas. Penggunaan TJ membantu menghindari kebingungan antara keluaran listrik dan produksi panas, karena energi panas diukur dalam joule, bukan watt-hour. Konversinya sederhana: 1 TWh = $3{,}6 \times 10^{15}$ joule = 3.600 TJ. Sebagai contoh, jaringan pemanasan distrik panas bumi yang memasok 180 TJ per tahun setara dengan 0,05 TWh.

32 Angka-angka ini mengasumsikan bauran konsumsi energi sebesar 50% batu bara, 30% minyak, dan 20% gas dari total 2.998.058,6 TJ, serta menggunakan faktor emisi CO_2 baku dari Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), yaitu: batu bara ≈ 94,6 tCO_2/TJ, minyak ≈ 73,3 tCO_2/TJ, dan gas alam ≈ 56,1 tCO_2/TJ. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (Vol. 2: Energy)*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html. See Table 2.2 in Chapter 2, "Stationary Combustion."

33 BPS-Statistics Indonesia. (2025). *Physical supply and use for GHG emission of Indonesia (thousand ton CO_2), 2023*. https://www.bps.go.id/en/statistics-table/2/Mjl4NyMy/physical-supply-and-use-for-ghg-emission-of-indonesia.html?utm_source=chatgpt.com

34 United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2022). *Enhanced Nationally Determined Contribution, Republic of Indonesia*. https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-09/23.09.2022_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf

35 Daftar lengkap temperatur proses untuk setiap kebutuhan energi panas disajikan dalam Lampiran 1.

36 Chandra Asri Group. (2024). *Chandra Asri annual report 2024: Unleashing transformational growth*. https://chandra-asri.com/en/investor/reports

37 Lu, H., de la Rue du Can, S., Letschert, V., Wong, H. L. C., Zhou, N., Wijaya, F., Hidayati, F., & Husodo, D. C. (2024). *Industry decarbonization roadmaps for Indonesia: Opportunities and challenges to net-zero emissions*. Lawrence Berkeley National Laboratory & Institute for Essential Services Reform.

38 Ministry of Energy and Mineral Resources, 2024.

39 GMI Research. (2025). *Indonesia flat glass market and analysis report–Opportunities and forecast 2025-2032*. https://www.gmiresearch.com/report/indonesia-flat-glass-market/

40 IEA, 2022.

41 Informasi yang disediakan dalam bagian ini dan bagian berikutnya didasarkan pada banyak referensi. Lihat akhir dari Lampiran 1 untuk semua sumber yang digunakan.

42 IEA, 2022.

43 Business Wire. (2024, November 14). *South East Asia existing and upcoming data center portfolio report 2024–2028: White-floor space, IT load capacity, retail colocation pricing, and wholesale colocation pricing* [Press release]. https://www.businesswire.com/news/home/20241114124821/en/South-East-Asia-Existing-Upcoming-Data-Center-Portfolio-Report-2024-2028-White-floor-Space-IT-Load-Capacity-Retail-Colocation-Pricing-and-Wholesale-Colocation-Pricing—-ResearchAndMarkets.com

44 Mordor Intelligence. (2025). *Data center market size and share analysis-growth trends and forecasts up to 2030*. https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/data-center-market

45 Data Center Map. (n.d.). *Indonesia data centers*. https://www.datacentermap.com/indonesia/

46 King, B., Ricks, W., Pastorek, N., & Larsen, J. (2025). *The potential for geothermal energy to meet growing data center electricity demand*. Rhodium Group. https://rhg.com/research/geothermal-data-center-electricity-demand/



47 Gooding, M. (2024, August 8). *Star Energy Geothermal in talks to supply clean power to Indonesian data center operators*. Data Center Dynamics. https://www.datacenterdynamics.com/en/news/star-energy-geothermal-in-talks-to-supply-clean-power-to-indonesian-data-center-operators/

48 King et al., 2025.

49 Agency for Meteorological, Climatological, and Geophysics. (n.d.). *Data online*. https://dataonline.bmkg.go.id/dataonline-home

50 International Heat Flow Commission (IHFC). (n.d.). *The global heat flow database*. https://ihfc-iugg.org/products/global-heat-flow-database/mapping-visualisation

51 INDOGEO Social Enterprise. (n.d.). *Geothermal gradient map of SE Asia*. https://indogeose.weebly.com/geothermal-gradient-map.html

52 Copernicus Climate Change Service (C3S). (2019). *ERA5-Land hourly data from 1950 to present* [Data set]. Climate Data Store (CDS). https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac

53 Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (n.d.). *Climate variability and change in Indonesia*. https://iklim.bmkg.go.id/publikasi-klimat/ftp/brosur/LEAFLETINGGRISB.pdf

54 BPS. (2023). *Indonesian population projection 2020-2050: Results of the 2020 population census*. https://www.bps.go.id/id/publication/2023/05/16/fad83131cd3bb9be3bb2a657/proyeksi-penduduk-indonesia-2020-2050-hasil-sensus-penduduk-2020.html

55 Institute for Essential Services Reform (IESR). (2024). *Indonesia energy transition outlook 2024*. https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2024/03/Indonesia-Energy-Transition-Outlook-2024-1.pdf

56 Cariaga, C. (2025, May 16). *Pioneering geothermal use for coffee production in Kamojang, Indonesia*. ThinkGeoEnergy. https://www.thinkgeoenergy.com/pioneering-geothermal-use-for-coffee-production-in-kamojang-indonesia/

57 Prioritas yang disajikan dalam laporan ini ditentukan menggunakan *Analytical Hierarchy Process* (AHP), sebuah kerangka kerja terstruktur untuk pengambilan keputusan. Metode yang sudah mapan ini memungkinkan evaluasi sistematis terhadap potensi aplikasi panas bumi dengan membandingkan faktor kualitatif dan kuantitatif. Model AHP menggabungkan enam kriteria utama untuk memastikan penilaian yang komprehensif, yaitu: industri yang sesuai (permintaan termal), ketersediaan sumber daya panas bumi, pertimbangan ekonomi (penghematan/biaya), perlindungan lingkungan dan sosial, risiko teknologi, serta regulasi dan insentif.

58 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *Indonesia's National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. Government of Indonesia. https://coolcoalition.org/wp-content/uploads/2024/08/ESCAP-2024-RP-Indonesia-National-Cooling-Action-Plan-1.pdf

59 IEA, 2022.

60 Al Asy'ari et al., 2024.

61 IEA, 2022.

62 Paul, S. D., & Kumar, K. R. (2025). Advancements in adsorption bed for cooling applications: A comprehensive review of configurations and operating parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *211*, 115301. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115301

63 International Energy Agency (IEA). (n.d.). *Energy system of Indonesia*. https://www.iea.org/countries/indonesia

64 Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (2024). *CHP technologies: Absorption chillers* [Combined Heat and Power Technology Fact Sheet series]. U.S. Department of Energy. https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/CHP_Absorption_Chillers.pdf





Bab 5

Mempersiapkan Tenaga Kerja Masa Depan: Peran Tenaga Kerja dan Institusi Sektor Minyak dan Gas Indonesia

Filda C. Yusgiantoro, Massita Ayu C. Putriastuti, dan Hidayatul M. Rohmawati
Purnomo Yusgiantoro Center

Hampir semua kekuatan yang dimiliki oleh operasi minyak dan gas Indonesia saat ini dapat disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan pengembangan panas bumi. Ini merupakan aset besar bagi Indonesia, karena pencapaian target yang diuraikan dalam laporan ini berpotensi menciptakan lebih dari 650.000 lapangan kerja, yang sebagian besar dapat diisi oleh tenaga kerja dari sektor minyak dan gas.

Sektor energi Indonesia saat ini tengah mengalami transformasi signifikan seiring dengan upaya negara untuk mengurangi ketergantungannya pada bahan bakar fosil. Komponen utama dari transformasi ini adalah perluasan energi terbarukan, khususnya energi panas bumi. Sumber daya panas bumi menawarkan banyak peluang untuk perluasan pembangkit listrik konvensional, sistem generasi baru, panas industri untuk penggunaan langsung, dan pendinginan berbasis panas bumi.

Faktanya, Indonesia memiliki beberapa potensi panas bumi terbaik di dunia, diperkirakan sekitar 23,7 gigawatt sumber daya konvensional[1] dan 2.160 gigawatt potensi panas bumi generasi baru (Lihat suplemen Bab 3, "Memperluas Cakupan: Peluang Panas Bumi Generasi Baru"). Potensi ini menempatkan Indonesia pada posisi yang sangat menguntungkan untuk mengembangkan energi panas bumi dalam skala besar. Hingga September 2025, kapasitas terpasang listrik panas bumi adalah 2.744 megawatt, yang berarti hanya 11,5% yang telah dimanfaatkan dari sumber daya konvensional negara. Bahkan, Indonesia dapat mencapai target 15 gigawatt listrik panas bumi dan 15 gigawatt panas bumi pada tahun 2035—serta 25 gigawatt listrik dan 35 gigawatt panas bumi pada tahun 2045 (lihat Bab 7, "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia", Rekomendasi #2). Jika tujuan ini tercapai, Indonesia dapat menghasilkan lebih dari 650.000 lapangan kerja baru.

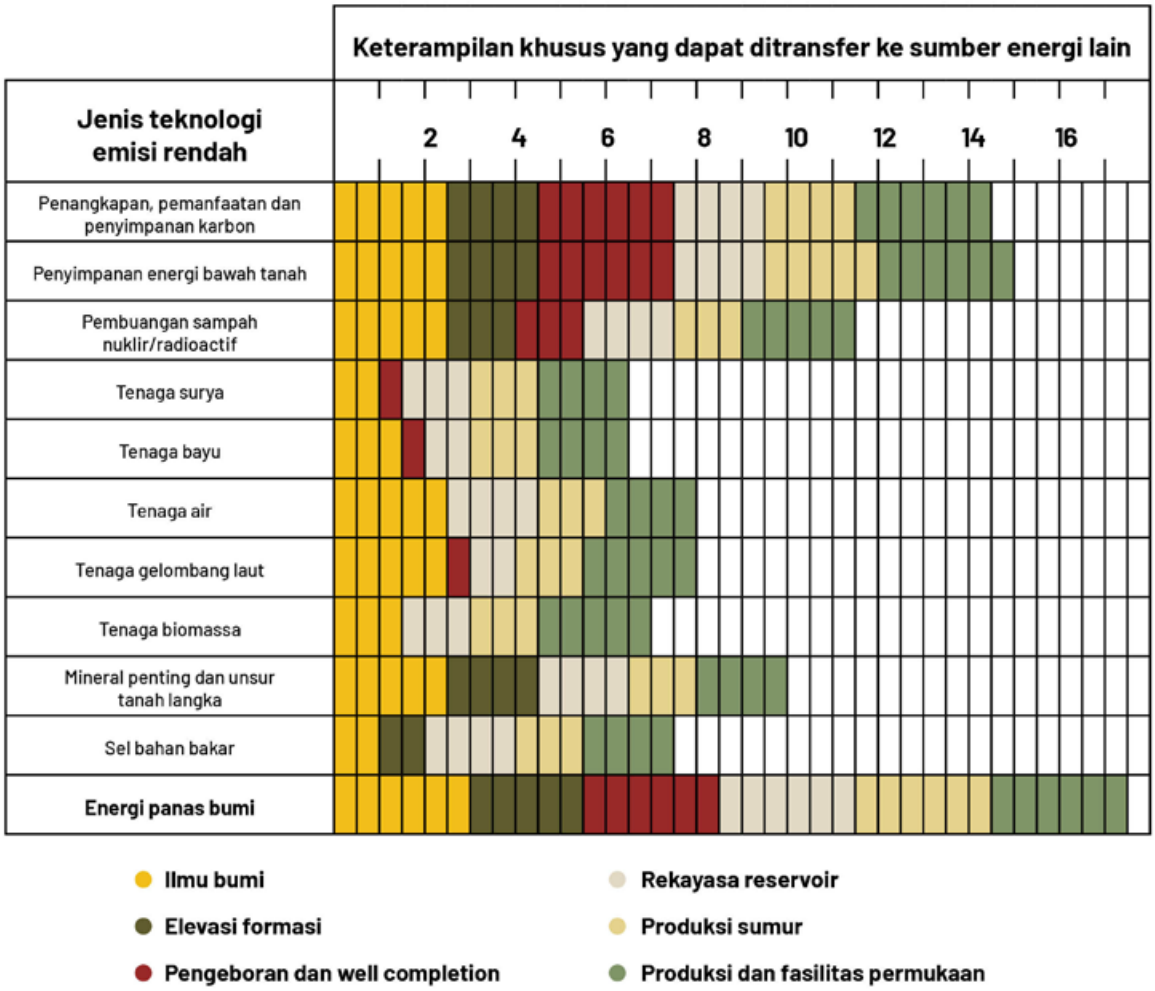


Namun, ketersediaan sumber daya hanyalah sebagian dari cerita: ekspansi panas bumi memiliki keunggulan tersendiri dibandingkan energi terbarukan lainnya karena adanya tumpang tindih yang signifikan dalam keterampilan, teknologi, dan infrastruktur dengan industri minyak, gas, dan pertambangan Indonesia yang telah lama berkembang, serta dukungan keahlian yang telah terbangun dari industri panas bumi konvensional.

TENAGA KERJA SEKTOR MINYAK DAN GAS INDONESIA SAAT INI DAN POTENSI PEKERJAAN DI SEKTOR PANAS BUMI

Indonesia telah aktif di sektor minyak dan gas sejak tahun 1800-an. Komitmen jangka panjang ini telah membantu membangun fondasi pengetahuan, pengalaman, dan infrastruktur yang kuat dalam ekstraksi bawah permukaan. Hampir semua kekuatan operasi minyak dan gas Indonesia yang ada dapat diadaptasi untuk memenuhi kebutuhan pengembangan panas bumi.[2] Ini merupakan aset besar bagi Indonesia, karena memastikan kehadiran tenaga kerja terampil untuk membantu mengembangkan sektor panas bumi sekaligus mempertahankan ketersediaan karier berkualitas bagi tenaga kerja minyak dan gas saat ini. Tenaga kerja ini dapat berkontribusi tidak hanya pada proyek pembangkit listrik panas bumi tradisional tetapi juga aplikasi panas bumi generasi baru, termasuk sistem yang dirancang untuk panas industri langsung dan aplikasi

KETERAMPILAN YANG DAPAT DIALIHKAN DARI INDUSTRI MINYAK DAN GAS

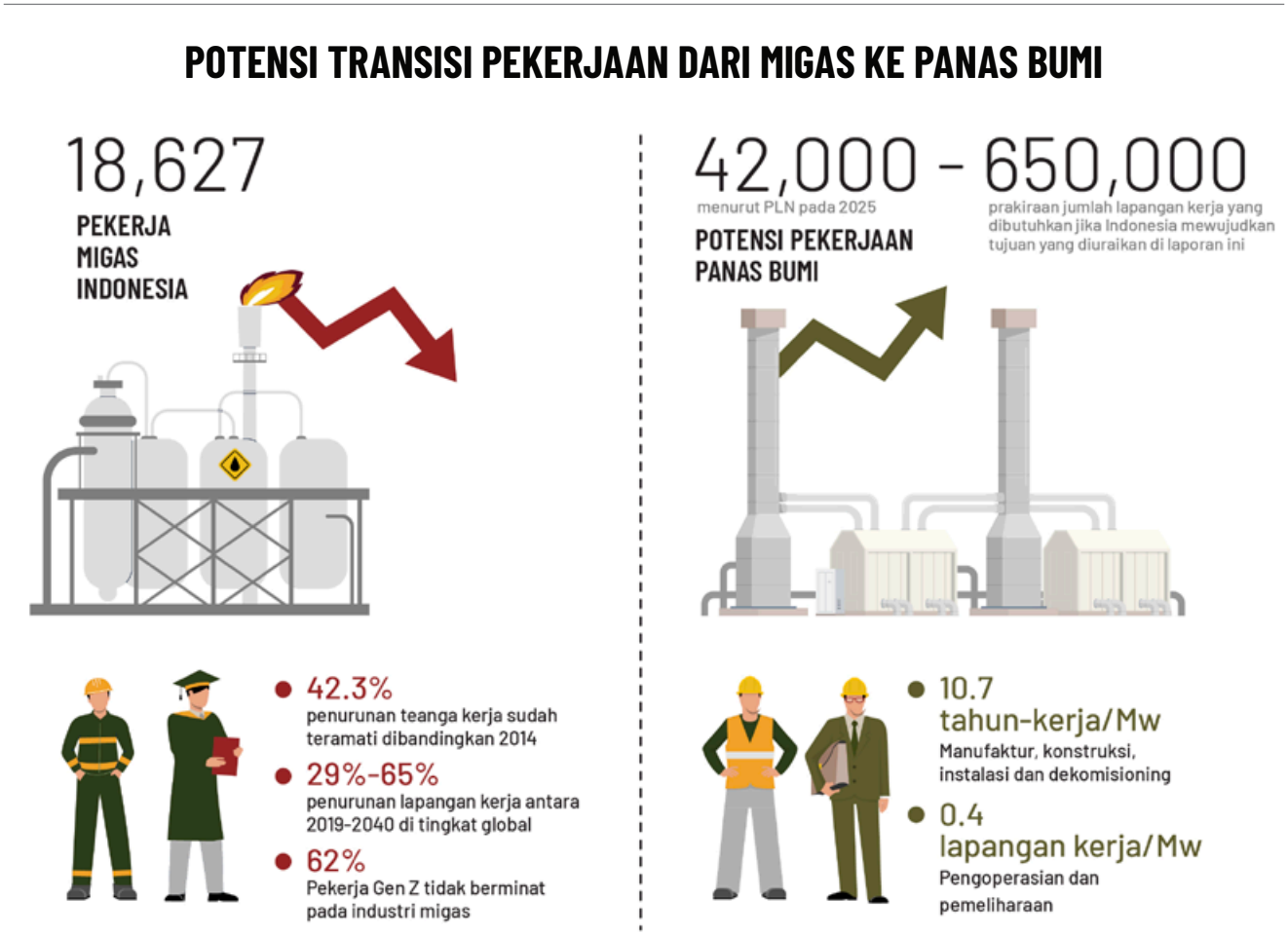


Gambar 5.1: Energi panas bumi menempati peringkat tertinggi jika mempertimbangkan potensi dampak transfer keterampilan minyak dan gas ke teknologi transisi energi dan rendah karbon lainnya. Sumber: Tayyib, D., Ekeoma, P. I., Offor, C. P., Adetula, O., Okoroafor, J., Egbe, T. I., & Okoroafor, E. R. (2023). *Keterampilan minyak dan gas untuk teknologi energi rendah karbon*. Konferensi dan Pameran Teknis Tahunan Society of Petroleum Engineers.

penyimpanan termal yang mendukung pendinginan dan stabilitas jaringan listrik.

Menurut data Satuan Tugas Khusus Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas (SKK Migas), pada tahun 2023, sektor minyak dan gas mempekerjakan 18.627 pekerja Indonesia[3]. Tenaga kerja di sektor minyak dan gas memiliki banyak keterampilan yang dapat diterapkan di sektor panas bumi, mulai dari ilmu geologi hingga pengeboran dan penyelesaian sumur (*well completion*) serta rekayasa reservoir dan produksi sumur (lihat **Gambar 5.1**). Pelatihan ulang dan reorientasi yang tepat dapat memperluas kumpulan talenta yang ada ini untuk memungkinkan pekerja berpartisipasi dalam proyek-proyek panas bumi, yang akan membantu mengatasi kebutuhan tenaga kerja yang muncul di sektor energi terbarukan sekaligus mengurangi potensi kehilangan pekerjaan di industri bahan bakar fosil.

Industri minyak dan gas (migas) global menghadapi tantangan struktural jangka panjang yang signifikan, termasuk fluktuasi harga, otomatisasi, dan pergeseran regulasi yang didorong oleh tujuan dekarbonisasi. Tenaga kerja di sektor migas Indonesia, khususnya di operasi hulu, mulai mengalami penurunan lebih dari satu dekade lalu, dengan total penurunan sekitar 42,3% antara tahun 2014 dan 2023.[4] Angka ini diperkirakan akan turun lebih jauh jika proyeksi di Indonesia akurat, yang dapat berarti potensi kehilangan antara 6.500 dan 14.700 pekerjaan tambahan—belum termasuk dampak percepatan perubahan iklim dan



Gambar 5.2: Estimasi jumlah potensi transisi pekerjaan dari minyak dan gas ke panas bumi. Sumber: Asosiasi Perminyakan Indonesia. (2017). *Gambaran umum Indonesia*; Satuan Tugas Khusus Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas (SKK Migas). (2023). *Laporan tahunan 2023*; Ernst & Young. (2020). *Preparing for the future now: Rethinking the oil and gas workforce in 2040*. EY Global; Halimatussadiah, A., Irhamni, M., Riefky, T., Nur Ghiffari, M., & Razak Afifi, FA(2024). *Dampak ketenagakerjaan dari transisi energi di Indonesia*. Lembaga Penelitian Ekonomi dan Sosial, Universitas Indonesia; PLN. (2025). *Rencana bisnis pasokan listrik PLN (2025-2034): Meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan energi nasional*. Pemerintah Indonesia.

upaya dekarbonisasi global, yang keduanya kemungkinan akan mendorong pengurangan yang lebih dalam pada tenaga kerja global di sektor energi fosil. Sebaliknya, tenaga kerja migas global mengalami pemulihan jangka pendek, menambah sekitar 590.000 pekerjaan pada tahun 2023 hingga mencapai 12,4 juta pekerja, didorong oleh pengembangan proyek-proyek baru.[5] Namun, terlepas dari pemulihan sementara ini, proyeksi jangka panjang tetap negatif: Skenario Emisi Nol Bersih pada tahun 2050 dari Badan Energi Internasional (IEA) memperkirakan penurunan 1,7 juta pekerjaan di sektor migas pada tahun 2030, dan lapangan kerja di sektor bahan bakar fosil secara lebih luas diperkirakan akan turun dari 12,6 juta menjadi 3,1 juta pada tahun 2050, memperlihatkan dengan jelas kontraksi struktural yang berkelanjutan di sektor ini.[6]

Survei industri migas PwC tahun 2015 menemukan bahwa sebagian besar responden memperkirakan penurunan peluang kerja dan kualitas tenaga kerja.[7] Pada saat yang sama, dukungan pemerintah Indonesia terhadap sektor migas tetap kuat, dan minat di kalangan lulusan baru masih relatif tinggi—sebagian besar karena gaji yang kompetitif di industri ini.

Dengan sumber daya yang melimpah, industri panas bumi di Indonesia memiliki potensi pertumbuhan yang signifikan. Seiring dengan peningkatan kapasitas negara untuk memenuhi target transisi energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) memperkirakan bahwa pengembangan panas bumi akan menciptakan lebih dari 4.000 lapangan kerja baru; PLN memperkirakan angka tersebut bisa mencapai 42.000. Dan jika sebagian besar sumber daya panas bumi negara dimanfaatkan, Proyek InnerSpace memproyeksikan angka yang jauh lebih tinggi, yaitu lebih dari 650.000 lapangan kerja baru. (**Gambar 5.2**).[8,9] Meskipun angka lapangan kerja ini tidak secara eksplisit dikaitkan dengan target penyebaran gigawatt tertentu (lihat Bab 2, "Menggerakkan Transisi: Pasar dan Peluang Panas Bumi Indonesia"), angka tersebut mencerminkan rencana pengembangan panas bumi pemerintah yang terus berkembang. Bidang karir dalam laporan ESDM meliputi eksplorasi lokasi, pengeboran, konstruksi pembangkit, instalasi sistem, dan operasi serta pemeliharaan jangka panjang.

Industri panas bumi memiliki dua fase utama penciptaan lapangan kerja: (a) konstruksi dan instalasi dan (b) operasi dan pemeliharaan. Fase konstruksi dan instalasi bersifat padat karya, karena melibatkan pekerjaan sipil, perakitan mekanik dan listrik, logistik, dan layanan terkait lainnya. Fase ini menghasilkan sekitar 10,7 tahun kerja per megawatt, tetapi pekerjaan ini bersifat sementara.[10] Fase operasi dan manajemen menciptakan lebih sedikit lapangan kerja, menghasilkan sekitar 0,4 posisi tetap per megawatt, tetapi peran ini cenderung bersifat jangka panjang dan permanen.[11] Posisi yang diciptakan dalam fase ini berfokus pada manajemen, perbaikan, dan optimalisasi pembangkit dan infrastruktur panas bumi.

Jika Indonesia mampu merealisasikan potensi penuh sebesar 23 gigawatt pembangkit listrik tenaga panas bumi konvensional pada tahun 2060 (sebagaimana diidentifikasi oleh ESDM dan diuraikan dalam Rencana Umum Kelistrikan Nasional; lihat Bab 2, "Menggerakkan Transisi: Pasar dan Peluang Panas Bumi Indonesia," untuk informasi lebih lanjut tentang target energi nasional), dampaknya berpotensi menciptakan hingga 255.300 lapangan kerja, jauh melebihi jumlah yang diprediksi oleh ESDM dan PLN—dengan catatan bahwa hal ini akan bergantung pada perluasan kapasitas panas bumi yang berkelanjutan dari tahun ke tahun. Angka ini mencakup sekitar 246.100 pekerjaan sementara selama fase konstruksi dan instalasi, serta setidaknya 9.200 pekerjaan tetap di bidang operasi dan pemeliharaan setelah kapasitas penuh tercapai. Jumlah ini akan melonjak hingga 660.000 lapangan kerja jika Indonesia mencapai target gabungan 60 gigawatt pembangkit listrik dan termal untuk tahun 2045 (lihat Bab 7, "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia"), berdasarkan metodologi yang diikuti oleh Lembaga Penelitian Ekonomi dan Sosial di Universitas Indonesia.[12]

Namun, mewujudkan tingkat pertumbuhan ini akan bergantung pada ketersediaan tenaga kerja terampil; penelitian di sektor panas bumi Indonesia menunjukkan bahwa kekurangan tenaga kerja dan keterbatasan keterampilan terapan selama ini menjadi menghambat pembangunan,[13] yang menunjukkan perlunya memperkuat kesiapan tenaga kerja nasional.

Untuk bab ini, Purnomo Yusgiantoro Center (PYC) melakukan penelitian untuk lebih memahami prospek energi panas bumi di sektor energi Indonesia yang sudah ada. Para peneliti mengumpulkan data primer melalui wawancara mendalam dengan pejabat industri dan para pakar dari berbagai instansi pemerintah, lembaga akademik, dan



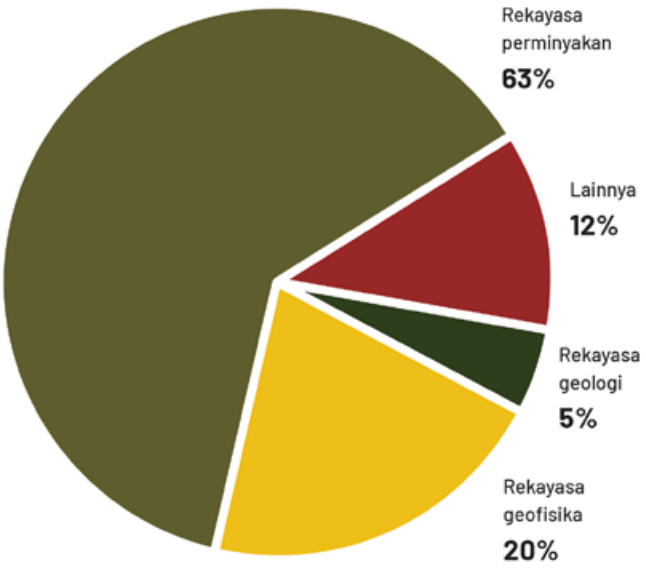
perusahaan energi, serta melalui survei terhadap lulusan baru yang ingin beralih ke karir di industri (**Gambar 5.3**).

Tujuan pengumpulan data ini adalah untuk menyoroti keterlibatan yang ada dalam perluasan dan pelatihan energi panas bumi, serta untuk memeriksa kesiapan tenaga kerja dan sikap umum terhadap energi panas bumi, baik sebagai peluang kelembagaan maupun sebagai jalur karier potensial. Temuan dari bagian ini memberikan dasar empiris untuk pembahasan selanjutnya tentang keterlibatan kelembagaan dan transisi tenaga kerja.

TRANSISI ANGKATAN KERJA: DARI MINYAK DAN GAS, PERTAMBANGAN, DAN UTILITAS KE ENERGI PANAS BUMI

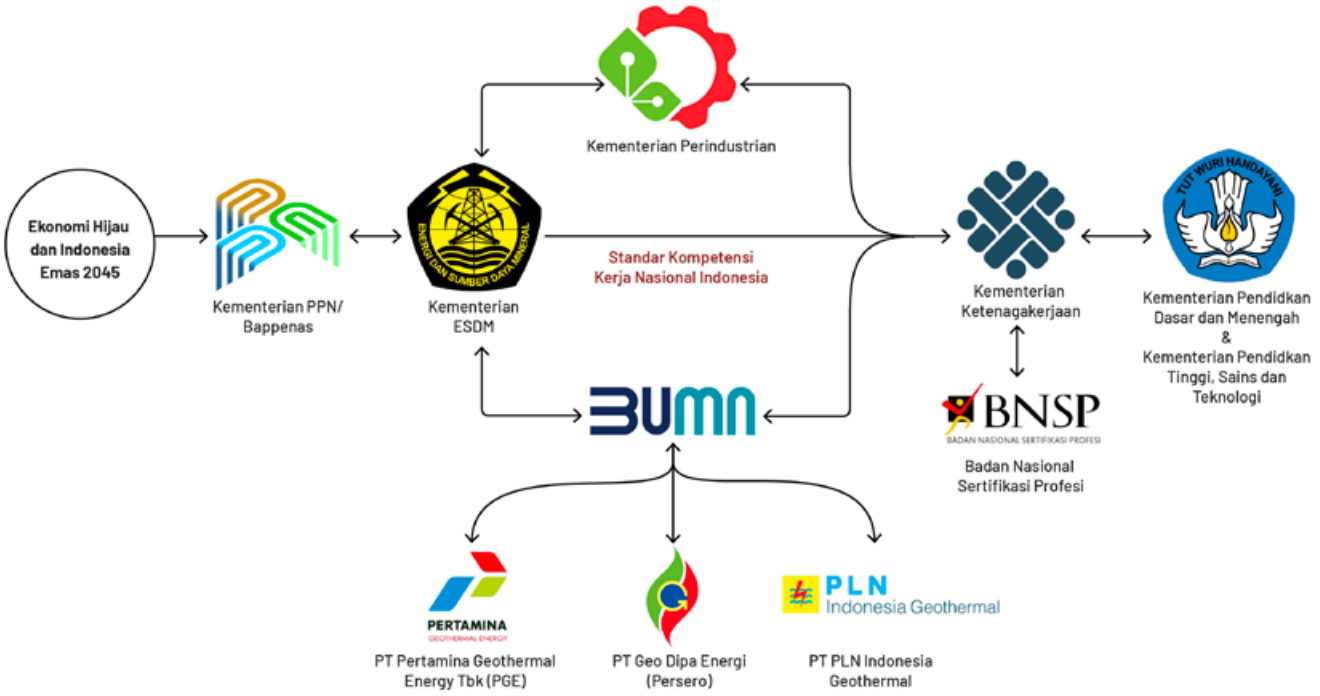
Kebijakan efektif yang dikembangkan melalui kolaborasi dengan para pelaku dari seluruh industri merupakan landasan bagi transisi tenaga kerja yang sukses. Penyelarasan di seluruh industri menciptakan alur yang kuat untuk pelatihan, penempatan karyawan, dan mobilitas tenaga kerja secara keseluruhan. Meskipun hubungan

RESPONDEN SURVEI MAHASISWA



Gambar 5.3: Rincian responden survei mahasiswa berdasarkan jurusan. Sumber: penulis.

ALUR KERJA KEMENTERIAN/LEMBAGA YANG TERLIBAT DALAM PENGEMBANGAN TENAGA KERJA DI SEKTOR ENERGI



Gambar 5.4: Alur kerja lembaga-lembaga utama yang terlibat dalam perencanaan dan implementasi tenaga kerja sektor energi. Sumber: penulis.

kelembagaan saat ini terfragmentasi dan sulit dinavigasi, Indonesia memiliki peluang untuk meningkatkan upaya penyelarasan yang sudah dilakukan di industri dan bergerak menuju strategi sektor yang lebih kohesif.

Salah satu elemen utama dari rencana transisi energi Indonesia adalah pengembangan ekonomi hijau, yang mencakup penekanan kuat pada sumber energi terbarukan dan rendah karbon.[14] Salah satu langkah nyata ke arah ini adalah peluncuran Peta Jalan Pengembangan Tenaga Kerja Hijau oleh Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) pada tahun 2025; peta jalan ini secara eksplisit selaras dengan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2025–2029.[15] Rencana ini membantu memandu strategi sektoral seperti Kebijakan Energi Nasional, memberikan informasi untuk rencana turunan seperti Rencana Umum Energi Nasional, dan menyediakan kerangka kerja menyeluruh untuk dokumen implementasi seperti Rencana Umum Kelistrikan Nasional dan Rencana Usaha Penyediaan Listrik PLN (lihat Bab 2, "Menggerakkan Transisi: Pasar dan Peluang Panas Bumi Indonesia"). Keselarasan ini memperkuat legitimasi kebijakan peta jalan dan menghubungkannya secara tegas dengan hierarki perencanaan nasional Indonesia. Meskipun berbagai lembaga pemerintah bertanggung jawab atas berbagai elemen transformasi ekonomi jangka panjang ini, terdapat dua kementerian yang berbagi pekerjaan mendasar yang merupakan kunci keberhasilan transisi angkatan kerja.

Bappenas menetapkan arah strategis nasional untuk peluang kerja yang ramah lingkungan—termasuk energi panas bumi—melalui penyusunan Peta Jalan Pekerjaan Hijau[16] sedangkan ESDM, sebagai otoritas utama di sektor energi, kemudian menerjemahkan target strategis ini menjadi kebijakan tenaga kerja yang praktis.[17]

Saat ini, Kementerian Ketenagakerjaan (Kemenaker) berkolaborasi dengan kementerian-kementerian sektoral seperti ESDM dan Kementerian Perindustrian untuk mengelola pengembangan standar yang menyediakan kerangka kerja untuk tolok ukur formal di setiap industri. Standar-standar ini kemudian dikelola melalui Badan Sertifikasi Profesional, di bawah Badan Nasional Sertifikasi Profesional.

Pemerintah, industri, dan pakar akademis di setiap sektor mengembangkan standar-standar ini—Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI)—melalui proses kolaboratif. Perwakilan sektor masing-masing mengusulkan standar yang berbeda, dan komite teknis kemudian menyusun standar tersebut untuk dikirim ke Kemenaker di bawah Direktorat Jenderal Pelatihan dan Pengembangan Produktivitas untuk ditinjau. Setelah difinalisasi, standar tersebut menjadi berkekuatan hukum melalui keputusan menteri. SDM memberikan dasar formal untuk program perekrutan, pelatihan, dan sertifikasi nasional. Misalnya, seorang teknisi yang ingin menjadi operator lapangan uap bersertifikat harus menyelesaikan pelatihan berdasarkan SKKNI yang relevan dan lulus ujian kompetensi yang dilakukan oleh Badan Sertifikasi Profesional yang berwenang.

PEKERJAAN TELAH DIMULAI: PETA PEKERJAAN DAN STANDAR KOMPETENSI KERJA NASIONAL

Transisi ekonomi sebesar ini membutuhkan perencanaan dan koordinasi yang signifikan. Sayangnya, program sertifikasi dan pelatihan panas bumi yang ada di Indonesia tidak dirancang untuk memanfaatkan kemampuan dan keterampilan teknis negara yang cukup besar. Namun, karena sektor ini sudah sangat terkait dengan industri

STANDAR KOMPETENSI KERJA EKSISTING YANG TERKAIT DENGAN PANAS BUMI

Nomor	Judul SKKNI
1	Operator dan Supervisor Pengujian Arus Fluida Sumur Panas Bumi
2	Operator Fasilitas Lapangan Uap Panas Bumi
3	Supervisor Operasi Panas Bumi
4	Ahli Geokimia Panas Bumi
5	Ahli Geologi Panas Bumi
6	Ahli Geofisika Panas Bumi
7	Pemeliharaan Peralatan Lapangan Uap
8	Pengambilan Sampel Fluida Sumur Panas Bumi

Gambar 5.5: Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia yang ada terkait pengembangan dan pengoperasian energi panas bumi. Tautan untuk setiap judul SKKNI memberikan informasi SKKNI yang sesuai.



migas Indonesia, negara memiliki banyak kesempatan untuk memperbaiki arah dan mempercepat transisi.

Peta pekerjaan yang jelas dan terkini untuk energi panas bumi dapat secara signifikan mempermudah upaya ini dengan memberikan gambaran umum tentang jenis pekerjaan, persyaratan keterampilan, dan kualifikasi yang dibutuhkan pada setiap tahap pengembangan energi panas bumi. Peta pekerjaan ini kemudian akan berfungsi sebagai referensi dasar untuk SKKNI, memastikan bahwa setiap standar secara akurat mencerminkan peran industri dan kebutuhan tenaga kerja yang muncul. Kejelasan pada tingkat ini memberdayakan setiap lembaga untuk melaksanakan mandatnya.

Beberapa upaya mendasar telah dimulai. ESDM, melalui Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia, sedang mengembangkan kebijakan tentang pengembangan modal manusia yang mengusulkan penyusunan peta pekerjaan nasional yang disesuaikan dengan sektor energi bersih dan khususnya energi panas bumi.[18] Pada saat penulisan bab ini, pembaruan kerangka kerja tersebut belum dipublikasikan. Setelah selesai, peta ini akan berfungsi sebagai dasar untuk hal-hal berikut:

- Pemetaan kesetaraan pekerjaan untuk memandu integrasi pekerja baru, termasuk lulusan kejuruan dan universitas, ke dalam peran yang relevan dengan industri. Pemetaan ini harus dipimpin oleh Kemenaker bersama Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi serta kementerian teknis terkait (seperti ESDM) sebagai pendamping.
- Proyeksi kebutuhan tenaga kerja yang memperkirakan berapa banyak pekerja yang dibutuhkan, dalam peran apa, dan di wilayah mana saja. Pengembangan proyek-proyek ini akan dikoordinasikan oleh Bappenas sebagai lembaga utama, dengan Kemenaker dan ESDM sebagai pendamping.
- Rekomendasi kebijakan dan regulasi yang disesuaikan dengan masing-masing mitra institusional, seperti Kementerian Tenaga Kerja untuk perlindungan dan pelatihan tenaga kerja serta Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi untuk pengembangan kurikulum.

Selain itu, sebuah kelompok ad hoc telah melakukan upaya perencanaan tenaga kerja dan menghasilkan delapan SKKNI khusus panas bumi (lihat **Gambar 5.5**). Secara paralel, ESDM bekerja sama dengan Kementerian Perindustrian dan Kementerian BUMN untuk memperbarui dan memperluas SKKNI panas bumi yang ada. Namun, rencana sertifikasi saat ini sebagian besar masih berfokus pada peran operasional yang sempit dan belum secara komprehensif membahas peran lintas sektoral atau transisional yang penting bagi tenaga kerja panas bumi modern, seperti manajemen proyek panas bumi, perizinan lingkungan, instrumentasi digital, atau audit keberlanjutan.

PLATFORM TRANSISI: AREA KERJA PANAS BUMI DI INDONESIA

Dari 63 Area Kerja Panas Bumi (WKP) di Indonesia, 17 di antaranya saat ini memiliki satu atau lebih pembangkit panas bumi yang beroperasi di lokasi tersebut (yang lainnya berada dalam berbagai tahap pengembangan, eksplorasi, konstruksi, atau persiapan tender). Lokasi-lokasi ini dapat berfungsi sebagai "platform transisi" di mana keterampilan, teknologi, dan pengalaman industri migas dapat diterapkan. Dengan beroperasinya pembangkit-pembangkit ini, berarti industri tersebut sudah memiliki banyak pengetahuan dan keterampilan berharga yang dapat membantu ekspansi (lihat **Gambar 5.1**). Sebagian besar pembangkit listrik panas bumi ini dioperasikan oleh perusahaan-perusahaan yang memiliki afiliasi langsung atau historis dengan sektor migas.

Sebuah studi tahun 2023 yang meneliti peran minyak dan gas dalam industri panas bumi menyoroti pentingnya transfer pengetahuan dan pembelajaran dalam mengurangi biaya keseluruhan pengembangan panas bumi untuk memanfaatkan skala ekonomi dan mendorong inovasi.[19] Manfaat paling langsung dan praktis untuk industri panas bumi generasi baru yang diperluas dapat berasal dari limpahan minyak dan gas, mengingat basis teknologi yang luas dan pengalaman operasional yang terakumulasi dari sektor migas. Indonesia dapat mengharapkan manfaat serupa karena tumpang tindih industri yang sebanding antara minyak dan gas dan panas bumi.

Perusahaan minyak dan gas memiliki posisi unik untuk menempatkan kembali para profesional minyak dan gas yang terampil ke dalam peran panas bumi dan berkontribusi pada pengembangan pelatihan, sertifikasi, dan standar kompetensi khusus industri. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.6, sebagian besar daerah panas bumi aktif dioperasikan oleh perusahaan yang



PERUSAHAAN PANAS BUMI DI INDONESIA DAN AFILIASI MEREKA DENGAN INDUSTRI

No.	Area Kerja Panas Bumi (WKP)	Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)	Perusahaan	Afiliasi Minyak dan Gas
1	Sibayak-Sinabung, Sumatera Utara	Sibayak	PT Pertamina Geothermal Energy Tbk (PGE)	Anak perusahaan PT Pertamina (Persero), perusahaan minyak nasional Indonesia
2	Lahendong-Tompaso, Sulawesi Utara	Lahendong		
3	Waypanas-Lampung	Ulubelu		
4	Karaha Bodas-Jawa Barat	Karaha		
5	Lumut Balai-Sumatera Selatan	Lumut Balai		
6	Kamojang-Darajat, Jawa Barat	Kamojang		
		Darajat	PT Star Energy Geothermal Darajat II	Awalnya dioperasikan oleh Chevron Geothermal, anak perusahaan dari Chevron Corporation (AS).
7	Cibeureum-Parabakti, Jawa Barat	Salak	PT Star Energy Geothermal Salak, Ltd	
8	Pangalengan, Jawa Barat	Wayang Windu	PT Star Energy Geothermal Wayang Windu Ltd.	
		Patuha	PT Geo Dipa Energi (Persero)	Awalnya merupakan usaha patungan antara Pertamina dan PLN
9	Dataran Tinggi Dieng, Jawa Tengah	Dieng		
10	Sibual-Buali-Sumatera Utara	Sarulla	PT Sarulla Operations Ltd (SOL)	Konsorsium yang terdiri dari: 1. Medco Power, dimiliki oleh Medco Energi, sebuah perusahaan energi yang berakar pada industri migas. 2. Inpex Corporation, sebuah perusahaan eksplorasi dan produksi Jepang. 3. Perusahaan Listrik Kyushu 4. Perusahaan Itochu 5. Ormat Technologies, Inc.
11	Ulumbu-NTT	Ulumbu	PT PLN (Persero)	Tidak ada
12	Muara Laboh-Sumatera Barat	Liki Pinangawan, Muara Laboh	PT Supreme Energy	Para pendiri memiliki latar belakang di Pertamina dan Total E&P.
13	Rantau Dedap-Sumatera Selatan	Rantau Dedap		
14	Sorik Marapi, Sumatera Utara	Sorik Marapi-Roburan-Sampuraga	PT Sorik Marapi Geothermal Power	Pemegang saham utama adalah PT Supraco Inondeisa, anggota Radiant Group, sebuah perusahaan jasa minyak dan gas.
15	Sokoria, NTT	Sokoria	PT Sokoria Geothermal Indonesia	Pemegang saham minornya adalah Bakrie Power, anggota Grup Bakrie
16	Mataloko, NTT	Mataloko	PT PLN (Persero)	Tidak ada
17	Blawan Ijen, East Java	Ijen	PT Medco Cahaya Geothermal	Anak perusahaan PT Medco Power, 25 dimiliki oleh Medco Energi, sebuah perusahaan energi dengan akar di bidang minyak dan gas.

Gambar 5.6: Pengembang panas bumi utama di Indonesia dan keterkaitannya dengan perusahaan induk atau anak perusahaan minyak dan gas. Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). *Laporan kinerja Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Tahun 2024*. Pemerintah Indonesia.



MASUKKAN DALAM KOTAK

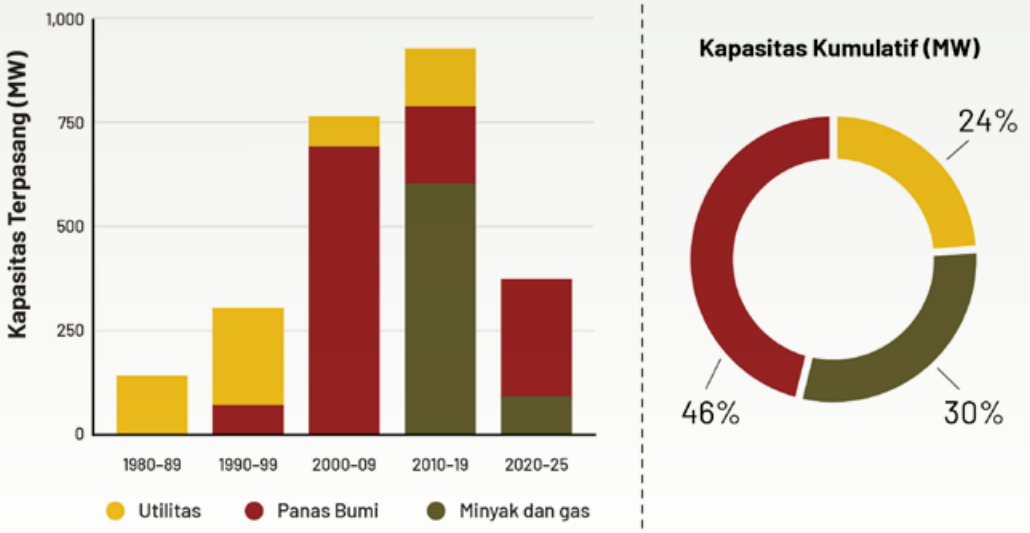
Pada tahun 1974, Survei Vulkanologi Indonesia menyelesaikan inventarisasi panas bumi selama lima tahun di Sumatra, Sulawesi, dan Kepulauan Halmahera.[20] Pada saat itu, sebuah dekrit dikeluarkan untuk menginstruksikan perusahaan minyak milik negara, Pertamina, untuk mengambil peran utama dalam pengembangan energi panas bumi di Indonesia. Dengan bantuan sebesar NZ$25 juta dari Pemerintah Selandia Baru, pengeboran eksplorasi dalam dilakukan di Darajat dan Kamojang di tahun yang sama. Hal ini akan meletakkan dasar bagi rencana pengembangan lima tahun ke depan, secara resmi mengurangi ketergantungan pada minyak dalam konsumsi secara keseluruhan serta meningkatkan eksplorasi sumber daya energi terbarukan.[21]

Pada tahun 1980-an, pemerintah meningkatkan upayanya untuk mengeksplorasi penggunaan panas bumi, khususnya di sektor kelistrikan. Pada tahun 1981, dekrit presiden lainnya mengizinkan Pertamina untuk melakukan usaha patungan dengan mitra lokal dan internasional untuk lebih mengembangkan panas bumi. Beberapa mitra mulai melakukan kegiatan pengeboran eksplorasi dan eksploitasi secara detail, memberikan beberapa rekomendasi untuk pembangunan pembangkit listrik,[22] yang akhirnya mengarah pada pengoperasian pembangkit listrik di Darajat dan Kamojang masing-masing pada tahun 1983 dan 1991.[23,24]

Saat ini, perusahaan minyak dan gas mengoperasikan, dalam hal kapasitas pembangkitan, 15% dari pembangkit listrik panas bumi global;[25] operator lainnya adalah pengembang panas bumi atau perusahaan utilitas energi. Perusahaan utilitas memegang pangsa yang lebih tinggi yaitu 62%. Di Indonesia, 46,4% pembangkit listrik panas bumi dimiliki oleh pengembang panas bumi dan produsen listrik independen Star Geothermal Energy, KS Orka, Supreme Energy, dan Geo Dipa Energi. Perusahaan minyak dan gas Pertamina (melalui anak perusahaan Pertamina Geothermal Energy) dan MedcoEnergi (melalui anak perusahaan Medco Power Indonesia) memiliki lebih dari 30% aset panas bumi nasional. (Anak perusahaan Medco membentuk usaha patungan dengan Ormat Technology Inc., yang dikenal sebagai Medco Cahaya Geothermal.) Medco baru-baru ini mencapai tanggal operasi komersial untuk pembangkit listrik panas bumi 35 megawatt di Blawan Ijen, Jawa Timur.[26] Perusahaan utilitas (PLN) dan salah satu anak perusahaannya mengoperasikan 23,5% (lihat **Gambar 5.7**). [27]

Kepemilikan pembangkit listrik panas bumi oleh industri migas yang relatif kecil menghadirkan sebuah peluang.[28] Tidak hanya itu, sebanyak 80% dari persyaratan untuk proyek panas bumi melibatkan kapasitas dan keterampilan yang serupa dengan yang ada di industri migas. (Lihat **Gambar 5.1** untuk melihat tumpang tindih keahlian antara industri migas dan pengembangan panas bumi).

KEPEMILIKAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI DI INDONESIA



Gambar 5.7: Distribusi kepemilikan di antara entitas publik, panas bumi, dan minyak & gas yang mengoperasikan pembangkit listrik panas bumi di Indonesia. Sumber: Disiapkan oleh IESR menggunakan data dari Global Energy Monitor. (2025). *Global Geothermal Power Tracker*; profil perusahaan untuk Geo Dipa Energi, Pertamina Geothermal Energy, PLN dan anak perusahaannya, Sarulla Operation, Star Geothermal Energy, dan Supreme Energy; Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. (tanpa tanggal). *GENESIS: Geothermal Energy Information System*.

berasal dari atau tetap terhubung dengan ekosistem minyak dan gas Indonesia.

Selain pemain domestik, penyedia jasa global di bidang perminyakan yang sudah mapan di Indonesia juga mulai terjun ke bidang panas bumi. Keterlibatan internasional ini tidak hanya menawarkan peluang transfer teknologi dan pengetahuan, tetapi juga meningkatkan persaingan untuk mendapatkan tenaga kerja lokal yang terampil, yang semakin mendesak kesiapan tenaga kerja nasional. Halliburton dan Schlumberger (sekarang SLB) sama-sama memperluas bisnis mereka ke bidang panas bumi. SLB mengakuisisi GeothermEx pada tahun 2010 khusus untuk fokus pada konsultasi panas bumi dan rekayasa reservoir. Perusahaan multinasional lain yang biasanya mendukung sektor migas berada pada tahap awal keterlibatan di bidang panas bumi di Indonesia. Viridien (sebelumnya CGG) mendukung PGE dari kantornya di Eropa dan sedang menunggu kejelasan regulasi lebih lanjut untuk memperluas kehadirannya di Indonesia. Cegal (Norwegia), National Energy Services Reunited (Timur Tengah), dan Repsol (Spanyol) juga memantau perkembangan dan mempersiapkan strategi masuk pasar panas bumi di Indonesia. Hubungan internasional yang muncul ini memposisikan Indonesia untuk menjadi pusat regional bagi pengembangan teknologi dan tenaga kerja panas bumi.

KESENJANGAN PENGETAHUAN DAN KETERAMPILAN

Eksplorasi dan Karakterisasi Sumber Daya

Memahami kompetensi teknis yang saling tumpang tindih sangat penting untuk merancang program pelatihan ulang yang tepat sasaran. Baik industri migas maupun industri panas bumi membutuhkan data bawah permukaan multi-sumber untuk memodelkan dan memprediksi kondisi geologi. Selama beberapa dekade, industri migas telah mengumpulkan data tersebut (misalnya, seismik, log sumur, dan sampel inti).[29] Dengan mengadopsi kerangka kerja yang berpusat pada data yang sama yang memanfaatkan alat, data, dan keahlian bersama, sektor panas bumi dapat menghilangkan risiko dari penilaian sumber daya dan penargetan lokasi sumur.[30] Industri panas bumi juga mengembangkan kumpulan data dan model bawah permukaan beresolusi tinggi untuk memandu pengembangan sumber daya yang ekonomis dan operasi pembangkit.[31] Namun, untuk memungkinkan ekspansi panas bumi generasi baru, Indonesia membutuhkan basis data bawah permukaan yang jauh lebih luas dan mudah diakses untuk memandu investasi dan pergeseran teknologi; Pusat Data dan Informasi ESDM[32] dapat memainkan peran ini.

Saat ini, data panas bumi Indonesia sulit diakses karena dikendalikan oleh negara, terfragmentasi di berbagai lembaga, dibatasi secara hukum, dan kurang terdigitalisasi. Meningkatkan aksesibilitas data akan sangat penting untuk mengembangkan sektor ini. Pembagian data semakin dibatasi oleh ketentuan kerahasiaan dan kepemilikan yang terfragmentasi di antara ESDM, SKK Migas, dan lembaga penelitian, yang menunjukkan perlunya kerja sama antarlembaga untuk menstandarisasi akses dan pelaporan. Publikasi sistematis data pengeboran dan kinerja dari program pemerintah serta program percontohan akan mempercepat replikasi, mengurangi risiko eksplorasi, dan membangun fondasi teknis untuk sistem panas bumi canggih (lihat Bab 7, "Mengubah Potensi Menjadi Energi: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia").

Pengeboran dan Penyelesaian Sumur

Baik industri migas maupun industri panas bumi menggunakan teknologi pengeboran dan penyelesaian sumur (*well completion*). Namun, untuk panas bumi konvensional, para engineer perlu mempelajari sistem vulkanologi, yang mungkin memerlukan pelatihan tambahan dalam memindahkan volume fluida yang lebih besar daripada di industri migas.[33] *Engineer* panas bumi juga terkadang harus bekerja pada suhu yang lebih tinggi (hingga 350°C) dan lingkungan yang lebih keras karena batuan beku.[34]

Teknologi Stimulasi

Pada sistem panas bumi generasi baru, khususnya sistem panas bumi yang direkayasa secara khusus, teknologi stimulasi digunakan untuk menciptakan permeabilitas tambahan guna mengakses panas. Stimulasi reservoir panas bumi memiliki teknik yang sama dengan fraktur hidrolik, tetapi seringkali menargetkan pengaktifan kembali retakan alami daripada pembuatan retakan baru.[35] Tekanan operasi dan bahaya seismisitas yang diinduksi bergantung pada lokasi dan mekanisme,



dan meskipun tekanan dan risiko terkait lebih rendah daripada operasi lapangan minyak,[36] praktik terbaik yang dapat dilakukan adalah merancang permeabilitas sambil mengelola risiko seismik dengan menggunakan sistem pemantauan dan respons berbasis ambang batas yang telah ditetapkan.[37] Jenis teknologi ini membutuhkan pengembangan keterampilan tambahan, yang harus diperkenalkan di seluruh ESDM melalui Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia, berkoordinasi dengan Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi untuk menyelaraskan standar pelatihan akademik dan profesional.

Manajemen Operasi dan Risiko

Tenaga kerja di sektor migas memiliki pengalaman dalam pembiayaan dan manajemen risiko untuk pengembangan sumber daya bawah permukaan, serta hubungan yang sudah ada dengan investor yang memahami persyaratan pengembangan bawah permukaan. Memanfaatkan hubungan ini dapat memfasilitasi investasi sektor swasta tambahan dalam proyek-proyek panas bumi.[38]

MENGEMBANGKAN TENAGA KERJA BARU: WAWANCARA DENGAN PARA PAKAR

Wawancara yang dilakukan PYC dengan para pakar pendidikan menyoroti cakupan kesenjangan kompetensi yang lebih luas bagi lulusan teknik perminyakan yang ingin beralih ke bidang panas bumi. Meskipun ada banyak keterampilan yang dapat ditransfer (misalnya, pengeboran, geomekanika), cakupan studi minyak dan gas lebih sempit daripada yang dibutuhkan oleh panas bumi (misalnya, pemodelan aliran panas, kimia panas bumi). Pengetahuan yang dibutuhkan di sektor energi panas bumi meliputi eksplorasi, eksploitasi, dan penggunaan hilir seperti pembangkitan listrik. Seiring dengan perluasan panas bumi di luar pembangkit listrik ke pemanasan dan pendinginan industri, pengetahuan yang dibutuhkan akan mencakup aplikasi suhu rendah dan menengah, integrasi sistem untuk manufaktur, dan teknologi panas bumi skala bangunan. **Gambar 5.1** mengilustrasikan bagaimana bidang keahlian lulusan baru atau engineer reservoir berpengalaman berkaitan dengan persyaratan untuk seorang engineer reservoir panas bumi.[39]

PROGRAM TERKAIT PANAS BUMI DI UNIVERSITAS DI INDONESIA

TIDAK	Universitas	Program yang Ditawarkan	Rincian Program
1	Universitas Gadjah Mada	Pusat Penelitian Panas Bumi	• Di bawah Departemen Teknik Geologi. • Mendorong kolaborasi multidisiplin, khususnya para peneliti dari Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
		Konsentrasi Geoteknologi Panas Bumi untuk Mahasiswa Magister Teknik Geologi	Di bawah Departemen Teknik Geologi.
2	Universitas Indonesia	Kursus geologi panas bumi	Ditawarkan sebagai mata kuliah wajib bagi mahasiswa S1 tahun ketiga jurusan Geologi di bawah Departemen Geosains, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
3	Veteran UPN Yogyakarta	Kelompok Penelitian Eksplorasi Panas Bumi	Di bawah Departemen Teknik Geofisika.
4	Universitas Padjajaran	• Kursus Eksplorasi Geokimia Panas Bumi • Kursus Geologi Panas Bumi Indonesia • Kursus Hidrogeokimia Panas Bumi	Ditawarkan sebagai mata kuliah pilihan bagi mahasiswa magister Program Studi Teknik Geologi.
5	Universitas Pertamina	Konsentrasi Geofisika Energi Baru dan Terbarukan untuk Jurusan Teknik Geofisika	Di bawah Program Teknik Geofisika.

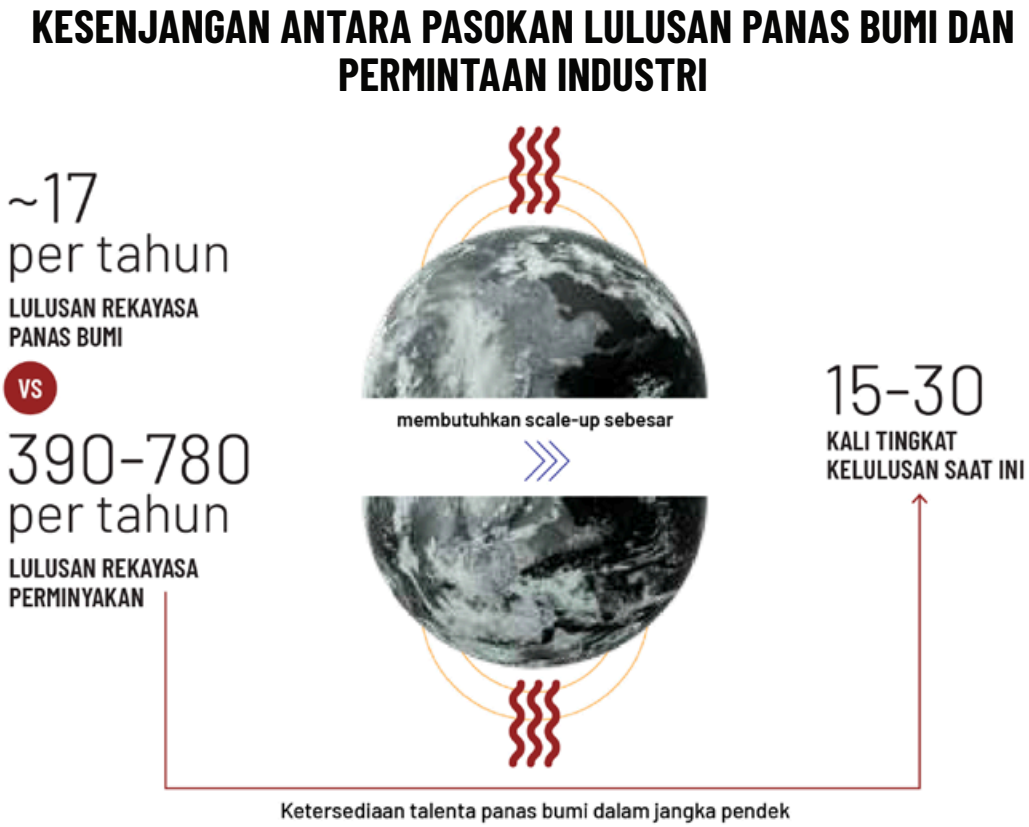
Gambar 5.8: Gambaran umum program gelar dan pelatihan terkait panas bumi di berbagai lembaga pendidikan tinggi di Indonesia.



Saat ini, kurikulum akademik di Indonesia masih kekurangan mata kuliah dan pelatihan dalam keterampilan utama seperti mitigasi risiko, ekonomi proyek, dan manajemen proyek lintas fungsi—semua keterampilan vital dalam operasi panas bumi. Kesenjangan ini menyoroti kebutuhan modernisasi kurikulum di bawah agenda transformasi vokasi Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi[40] serta Peta Jalan Pengembangan Tenaga Kerja Hijau Bappenas.[41] Para pelaku industri yang berpengalaman akan memiliki peran penting dalam memandu reformasi kurikulum, menawarkan platform pelatihan praktis, dan meningkatkan kesiapan kerja lulusan baru.

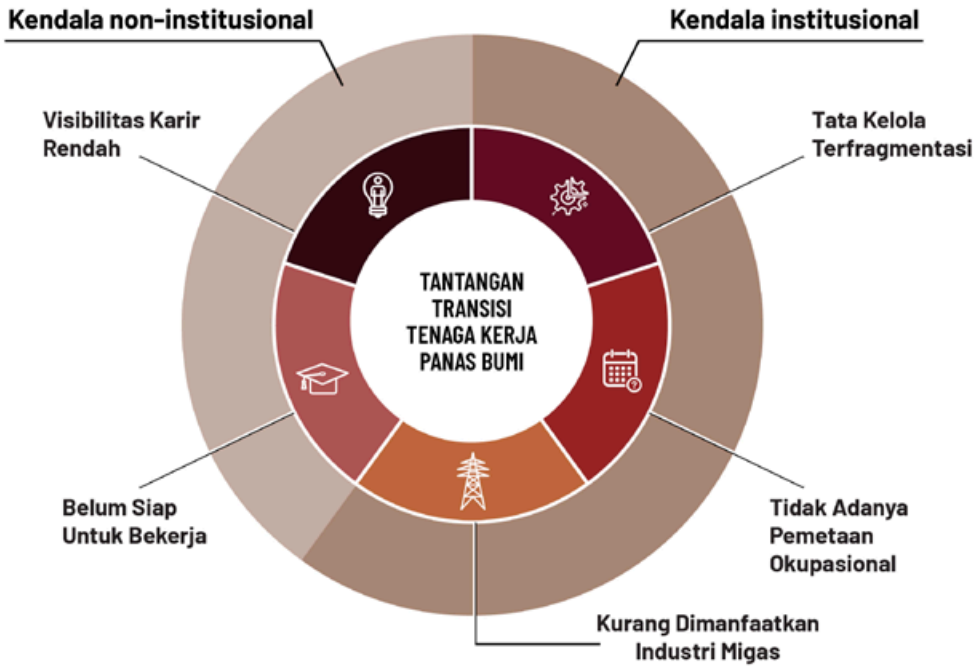
Saat ini Indonesia memiliki dua program pendidikan formal yang secara khusus berfokus pada Teknik Panas Bumi. Institut Teknologi Bandung (ITB) telah menawarkan program magister di bidang panas bumi sejak tahun 2008, menghasilkan total 288 lulusan, atau 12 orang per tahun. Sebagian besar alumni telah berhasil memasuki dunia kerja, dengan 36% bekerja di perusahaan pengembangan panas bumi dan 24% di industri terkait. Sebagian lainnya berkarir di bidang akademik dan instansi pemerintah atau melanjutkan studi hingga tingkat doktoral.[42] Program ITB juga menawarkan jalur cepat bagi mahasiswa S1 Teknik Perminyakan yang ingin belajar di program magister panas bumi dengan menyediakan mata kuliah pengantar terkait topik panas bumi di tahun ketiga. ITB juga menyediakan pelatihan kerja sama dengan perusahaan panas bumi Indonesia seperti Geo Dipa Energi dan PLN untuk meningkatkan keterampilan karyawan. Program kedua telah ditawarkan sejak tahun 2012 oleh Universitas Indonesia, di mana mahasiswa dapat mengikuti program magister di bidang eksplorasi panas bumi. Universitas-universitas lain di Indonesia hanya menawarkan mata kuliah pilihan di bidang panas bumi atau menyediakan sumber daya melalui pusat penelitian, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5.8**.

Sebaliknya, setidaknya 13 universitas di seluruh Indonesia menawarkan program teknik perminyakan.[43] Setiap universitas menghasilkan sekitar 30 hingga 60 lulusan, yang berarti setiap tahun sekitar 390 hingga 780 lulusan baru mencari pekerjaan di industri migas—23 hingga 46 kali lebih banyak daripada di sektor panas bumi. Banyak



Gambar 5.9: Perbandingan proyeksi kebutuhan tenaga kerja panas bumi dan jumlah lulusan saat ini, menyoroti kekurangan pasokan tenaga kerja terampil. Sumber: perhitungan penulis.

HAMBATAN UNTUK PENGEMBANGAN TENAGA KERJA PANAS BUMI DARI SEKTOR MINYAK DAN GAS



Gambar 5.10: Hambatan institusional dan non-institusional utama yang memengaruhi transfer keterampilan tenaga kerja dari sektor migas ke pengembangan panas bumi. Sumber: penulis.

dari lulusan ini memiliki kompetensi yang juga dibutuhkan untuk pekerjaan di sektor panas bumi, khususnya di bidang teknik bawah permukaan, pengeboran, dan manajemen reservoir. Memanfaatkan jalur pendidikan perminyakan untuk memenuhi kebutuhan tenaga kerja di sektor panas bumi akan membantu mendiversifikasi prospek karir lulusan dan mempercepat perluasan sumber daya manusia di sektor panas bumi.

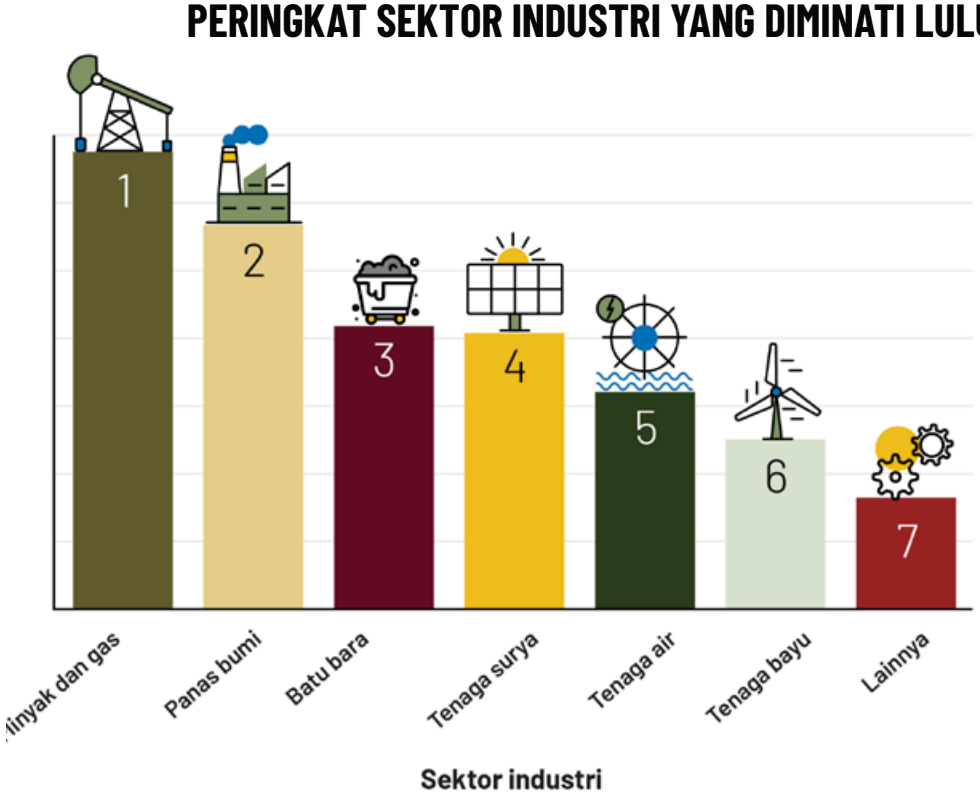
Menurut ESDM, pembangkit listrik panas bumi yang saat ini beroperasi di seluruh negeri mempekerjakan lebih dari 5.200 pekerja langsung dan sekitar 870.000 pekerja tidak langsung.[44] Rencana pengembangan panas bumi yang ada memproyeksikan kebutuhan tenaga kerja mulai dari 4.000[45] hingga 42.000[46] pekerja langsung pada tahun 2060 untuk memenuhi target kebijakan nasional. (Lihat Bab 2, "Menggerakkan Transisi: Pasar dan Peluang Panas Bumi Indonesia" untuk informasi lebih lanjut tentang target nasional.) Untuk memenuhi target yang lebih rendah, lembaga pendidikan tinggi Indonesia perlu menghasilkan 6 hingga 7 kali lipat jumlah lulusan berkualitas saat ini—antara sekitar 115 dan 120 lulusan per tahun, naik dari 17 lulusan saat ini. Menghasilkan 42.000 pekerja bersertifikasi panas bumi akan membutuhkan 15 hingga 30 kali lipat jumlah lulusan saat ini (Gambar 5.9). Peningkatan skala ke tingkat ini tidak hanya membutuhkan perluasan program akademik tetapi juga sistem akreditasi yang kuat, jalur sertifikasi, dan keselarasan industri yang lebih erat untuk memastikan bahwa hasil pelatihan sesuai dengan kebutuhan tenaga kerja. Dengan perubahan pada program sertifikasi, banyak dari pekerjaan ini berpotensi diisi oleh pekerja di sektor migas.

HAMBATAN DALAM PENGEMBANGAN TENAGA KERJA DI BIDANG PANAS BUMI

Indonesia memang menghadapi hambatan dalam mengembangkan tenaga kerja panas bumi yang kuat dan responsif, khususnya dalam konteks transisi tenaga kerja dan keahlian dari sektor migas. Hambatan-hambatan ini dikategorikan menjadi kendala kelembagaan dan non-kelembagaan (**Gambar 5.10**).

Jalur Karier yang Tidak Dikenal dan Kurang Terampil

Dalam wawancara dan survei PYC, para pemberi kerja di sektor panas bumi Indonesia secara konsisten melaporkan bahwa lulusan baru kurang memiliki keterampilan interdisipliner dan kesiapan lapangan yang



Gambar 5.11: Peringkat preferensi sektor industri berdasarkan survei di kalangan lulusan baru Indonesia. Sumber: penulis.

dibutuhkan untuk lingkungan proyek yang kompleks. Pelatihan cenderung sempit dan teoritis, menawarkan paparan minimal terhadap ekonomi, proses perizinan, dan keterlibatan pemangku kepentingan. Akibatnya, lulusan sering kesulitan saat memasuki dunia kerja.

Meskipun Indonesia memiliki potensi panas bumi yang sangat besar, sektor ini masih relatif kurang dikenal dan diremehkan di kalangan mahasiswa dan profesional muda. Panas bumi sering dianggap memiliki keterbatasan teknis dan kurang menguntungkan dibandingkan minyak dan gas. Masalah-masalah ini menghambat kemampuan sektor ini untuk bersaing memperebutkan lulusan terbaik. Penyertaan modul panas bumi dalam program penyuluhan universitas, beasiswa yang didukung pemerintah atau industri, dan penempatan kerja dapat membantu mengatasi persepsi ini.

Survei PYC menemukan bahwa terlepas dari keterampilan yang dapat ditransfer, 84% responden lebih memilih minyak dan gas sebagai pilihan karir pertama mereka; hanya 7% yang memilih panas bumi sebagai pilihan utama mereka. Panas bumi dipilih sebagai jalur pilihan kedua oleh 66% responden (lihat **Gambar 5.11**). Hampir 63% lulusan menempatkan gaji dan tunjangan yang menarik sebagai prioritas utama mereka dalam pengambilan keputusan karir, memperkuat persepsi bahwa industri migas menawarkan imbalan finansial yang lebih unggul. Sebaliknya, pertimbangan sosial dan lingkungan menempati peringkat terendah di antara faktor-faktor yang memengaruhi pilihan karir responden, menyoroti kesenjangan nilai yang terus-menerus yang dapat menghambat minat pada karir energi bersih.

Untuk menyelaraskan pengembangan tenaga kerja di bidang panas bumi dengan target kapasitas nasional, Indonesia harus meningkatkan dan mendiversifikasi jalur pendidikan panas bumi, termasuk mendirikan program gelar baru, mengintegrasikan konten panas bumi ke dalam disiplin ilmu terkait, dan memperluas program kejuruan dan diploma di seluruh rantai nilai panas bumi.

Selama wawancara yang dilakukan PYC, seorang konsultan panas bumi menyebutkan bahwa mereka menawarkan pelatihan untuk mengisi "kesenjangan kompetensi" bagi para profesional yang ingin beralih karier ke bidang panas bumi. Kursus-kursus tersebut berkisar dari tingkat pemula hingga mahir dan mencakup keterampilan teknis seperti pengelolaan sumur dan keterampilan non-teknis seperti manajemen proyek dan aspek ekonomi.

Tata Kelola yang Terfragmentasi dan Koordinasi Kelembagaan yang Lemah

Seperti yang dijelaskan sebelumnya dalam bab ini, perencanaan tenaga kerja Indonesia untuk sektor panas bumi masih terfragmentasi secara kelembagaan. Mandat Bappenas (perencanaan); ESDM (kebijakan sektoral); Kemenaker (pengembangan tenaga kerja); dan Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi (pendidikan dan pelatihan) tidak selaras di bawah kerangka kerja operasional yang sama, yang membuat perumusan kebijakan, pendanaan, desain kurikulum, dan pelatihan sulit dilaksanakan. Indonesia akan mendapat manfaat dari mempelajari bagaimana negara-negara seperti Selandia Baru dan India bekerja lintas kementerian dan menyelaraskan pengembangan keterampilan dengan tujuan transisi energi nasional.[47]

Tidak Adanya Pemetaan Okupasi Komprehensif untuk Transisi Geotermal

Tanpa taksonomi yang jelas tentang pekerjaan yang muncul, kompetensi yang dibutuhkan, dan hasil pembelajaran, lembaga-lembaga seperti Kementerian Tenaga Kerja dan Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi tidak dapat merancang program yang koheren untuk meningkatkan tingkat keterampilan yang dibutuhkan untuk angkatan kerja atau mengembangkan strategi kurikulum. Kurangnya pemetaan pekerjaan juga membatasi keselarasan sektor swasta dengan rencana pengembangan sumber daya manusia nasional. Pengalaman internasional seperti platform European Skills, Competences, Qualifications and Occupations (ESCO) Uni Eropa.[48] Dewan Keterampilan untuk Pekerjaan Ramah Lingkungan di India[49] menggambarkan

PEMETAAN REKOMENDASI UNTUK MASING-MASING HAMBATAN

Rekomendasi			Hambatan				
			Tata Kelola Terfragmentasi	Tidak Adanya Pemetaan Okupasional	Kurang Dimanfaatkan Industri Migas	Belum Siap untuk Bekerja	Visibilitas Karir Rendah
Menyiapkan Fondasi Kelembagaan dan Strategis	Rekomendasi #1	Pementukan Satuan Tugas Transisi Tenaga Kerja Energi	✓	✓	✓	✓	✓
	Rekomendasi #2	Pengembangan Kerangka Program Bridging dan Sertifikasi Cepat untuk Profesional Migas	✓	✓	✓	✓	✓
Implementasi Program dan Pengembangan Sistem	Rekomendasi #3	Pelembagaan Peta Okupasional Panas Bumi dan SKKNI	✓	✓	✓	✓	✓
	Rekomendasi #4	Uji Coba Program Imersi Panas Bumi untuk Mahasiswa Tingkat Akhir dan Lembaga Kejuruan	✓	✓	✓	✓	✓

Gambar 5.12: Kaitan antara kendala yang teridentifikasi dalam pengembangan tenaga kerja panas bumi dan rekomendasi strategis yang sesuai. Sumber: penulis.

bagaimana kerangka kerja pekerjaan yang terstruktur dapat memfasilitasi mobilitas tenaga kerja, standardisasi, dan desain kurikulum. Bagi Indonesia, pelajaran ini menekankan perlunya mengembangkan Peta Pekerjaan Panas Bumi Nasional di bawah SKKNI untuk menyatukan perencanaan tenaga kerja dan sertifikasi keterampilan di seluruh sektor panas bumi.

Kurang Dimanfaatkannya Industri Minyak dan Gas sebagai Mitra Transisi Tenaga Kerja

Meskipun terdapat tumpang tindih kompetensi yang kuat antara sektor migas dengan panas bumi, keahlian para profesional minyak dan gas masih kurang dimanfaatkan dalam transisi tenaga kerja di Indonesia. Mekanisme untuk mengenali dan mentransfer keterampilan ini ke proyek-proyek panas bumi masih terbatas, sehingga mengakibatkan hilangnya peluang untuk mempercepat alokasi tenaga kerja dan mengatasi kesenjangan kapasitas yang mendesak.

STRATEGI UNTUK MENGATASI HAMBATAN

Strategi dan rekomendasi berikut ini berfokus pada mekanisme praktis untuk mengatasi hambatan. Setiap strategi dipetakan ke kendala spesifik yang ditanganinya. Seiring Indonesia menyempurnakan kerangka pelatihan dan sertifikasinya, Indonesia harus merancang program yang mencerminkan spektrum penuh teknologi panas bumi—konvensional, generasi baru, dan penggunaan langsung—yang akan membantu mempersiapkan tenaga kerja tidak hanya untuk pembangkit listrik tetapi juga panas industri dan sistem pendinginan panas bumi (lihat **Gambar 5.12**).

Meletakkan Landasan Kelembagaan dan Strategis

Indonesia memiliki semua elemen yang diperlukan untuk membangun perekonomian yang dinamis. Tenaga kerja di bidang panas bumi dengan mekanisme kelembagaan yang kuat dan koherensi kebijakan. Empat rekomendasi berikut dapat membantu negara menjembatani sektor-sektor, memobilisasi pemangku kepentingan, dan menyampaikan program-program yang dapat berkembang.

#1: Membentuk Satuan Tugas Transisi Tenaga Kerja Energi.

Satuan Tugas Transisi Tenaga Kerja Energi (Satgas TTKE) harus diformalkan melalui instruksi presiden untuk memastikan mandat lintas kementerian yang kuat, penyelarasan sumber daya, dan keberlanjutan kebijakan. Satgas ini akan dikoordinasikan oleh Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia di Kementerian Energi dan Sumber Daya Manusia (ESDM), yang bertindak sebagai sekretariat, dengan anggota dari Kementerian Tenaga Kerja (Kemenaker); Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi; Bappenas; Badan Nasional Sertifikasi Profesi; dan asosiasi industri.

Mandat satgas ini akan mencakup proyeksi tenaga kerja, pemetaan pekerjaan, pelatihan, dan perancangan sertifikasi. Melalui platform koordinasi terpadu, Satgas TTKE akan menjembatani tata kelola yang terfragmentasi dalam perencanaan tenaga kerja, menyelaraskan kebutuhan pendidikan dan industri, serta memandu pengembangan standar pekerjaan transisi energi panas bumi dan energi yang lebih luas untuk meningkatkan kesiapan kerja lulusan dan ketahanan tenaga kerja sektoral.

#2: Mengembangkan Kerangka Program Penghubung dan Sertifikasi Jalur Cepat untuk Para Profesional Minyak dan Gas.

Kerangka kerja terstruktur untuk menghubungkan industri-industri tersebut harus secara formal mengakui kompetensi minyak dan gas yang relevan dengan panas bumi. Pengembangan kerangka kerja ini akan dimulai dengan matriks kesetaraan yang memetakan peran pekerjaan minyak dan gas ke fungsi panas bumi, diikuti dengan pelatihan untuk menutup kesenjangan tersebut. Mengintegrasikan program ini ke dalam SKKNI dan menggunakan Pengakuan Pembelajaran Sebelumnya di bawah Badan Nasional untuk Sertifikasi Profesional sebagai mekanisme untuk memvalidasi kompetensi yang ada akan memungkinkan para profesional minyak dan gas saat ini untuk melakukan transisi secara efisien.

Selain itu, pengembangan program sertifikasi jalur cepat akan memvalidasi keterampilan yang dimiliki para profesional minyak dan gas terhadap standar SKKNI



panas bumi. Penyusunan jalur untuk menjembatani kesenjangan keterampilan dapat menutup celah kecil, dengan sertifikasi yang terkait dengan jalur perekrutan langsung. Proses ini menciptakan mekanisme formal untuk menyerap pekerja terampil ke sektor panas bumi dan membantu memastikan negara memiliki tenaga kerja yang dibutuhkan untuk memenuhi pertumbuhan besar dalam energi, pemanasan, dan pendinginan panas bumi.

Tindakan-tindakan ini akan memastikan bahwa pengalaman puluhan tahun dalam eksplorasi bawah permukaan, pengeboran, dan manajemen proyek digunakan untuk energi panas bumi. Tindakan ini juga akan meningkatkan visibilitas karier di bidang panas bumi dengan menunjukkan jalur yang jelas dan terstruktur bagi para profesional minyak dan gas untuk memasuki sektor ini, sehingga menjadikan panas bumi sebagai pilihan karier yang lebih menarik.

Implementasi Program dan Pembangunan Sistem

Setelah fondasi kelembagaan terbentuk, langkah selanjutnya adalah memperluas program dan sistem yang memastikan kesiapan tenaga kerja jangka panjang.

#3:Melembagakan Peta Pekerjaan Panas Bumi dan SKKNI.

Peta pekerjaan geotermal nasional harus mendefinisikan kelompok pekerjaan di seluruh siklus hidup proyek dan menerjemahkannya ke dalam dokumen SKKNI formal. Langkah ini akan memberikan kejelasan tentang keterampilan yang dibutuhkan sekaligus menetapkan standar bersama di seluruh kementerian dan lembaga pelatihan. Selain itu, hal ini akan memperkuat kesiapan kerja lulusan, karena kurikulum dan sertifikasi akan secara langsung terkait dengan hasil pekerjaan yang telah ditentukan dan diakui oleh pemerintah dan industri.

#4: Program Percontohan Pendalaman Panas Bumi untuk Mahasiswa Tingkat Akhir dan Lembaga Vokasi.

Lokasi proyek panas bumi dan kementerian serta lembaga terkait harus mengembangkan program magang selama tiga hingga enam bulan di lokasi proyek panas bumi bagi mahasiswa tingkat akhir, yang akan memberikan pengalaman praktis dan bimbingan dalam eksplorasi, pengeboran, pengujian reservoir, dan operasi. Program ini akan memastikan bahwa pengetahuan teoretis dilengkapi dengan keterampilan dunia nyata. Rekomendasi ini juga menanggapi rendahnya visibilitas dan daya tarik karier di bidang panas bumi, karena keterlibatan langsung dengan proyek-proyek aktif akan menunjukkan relevansi panas bumi, potensi karier, dan kontribusinya terhadap transisi energi Indonesia.

KESIMPULAN

Potensi panas bumi Indonesia tidak hanya menawarkan jalur menuju pembangkitan energi rendah karbon, tetapi juga peluang berharga untuk menyerap dan mengerahkan kembali talenta dari sektor bahan bakar fosil yang sedang menurun. Keselarasan ini memastikan bahwa pertumbuhan energi Indonesia bebas karbon, adil secara sosial, dan menjamin lapangan kerja. Dengan negara yang menghadapi pergeseran struktural dalam lanskap energi global, membangun tenaga kerja panas bumi yang terampil dan responsif sangat penting untuk memastikan transisi energi yang inklusif dan adil.

Indonesia menempati posisi unik untuk mengejar transisi tenaga kerja yang berpusat pada panas bumi: Indonesia memiliki sumber daya dan tenaga kerja. Mulai dari eksplorasi dan pengeboran hingga pengelolaan reservoir dan operasi pembangkit, banyak fungsi teknis di sektor migas serta panas bumi di Indonesia tidak hanya analog tetapi seringkali dapat dipertukarkan, dengan beberapa pelatihan yang ditargetkan. Selain itu, warisan kelembagaan dalam pendidikan, pelatihan, dan keahlian industri—terutama di perusahaan milik negara dan perusahaan afiliasi minyak dan gas—dapat berfungsi sebagai aset berharga untuk mempercepat kesiapan tenaga kerja di bidang panas bumi.

Transisi ini harus mencakup semua solusi panas bumi. Pemanfaatan panas secara langsung, aplikasi industri, dan pendinginan panas bumi dapat melipatgandakan manfaat pembangkit listrik dan menciptakan sistem energi terpadu yang tangguh yang mendukung tujuan dekarbonisasi dan efisiensi Indonesia yang lebih luas. Mengintegrasikan aplikasi generasi baru dan aplikasi termal ini ke dalam pelatihan, kebijakan, dan perencanaan investasi akan memastikan Indonesia memanfaatkan sepenuhnya potensi ekonomi dan lapangan kerja dari energi panas bumi. Dengan pelatihan



dan sertifikasi yang tepat, pertumbuhan panas bumi dapat menopang lebih dari 600.000 lapangan kerja terampil yang berkelanjutan di seluruh Indonesia.

Namun, kemajuan berjalan lambat karena beberapa hambatan yang tidak kunjung usai. Secara institusional, ekosistem pengembangan tenaga kerja Indonesia masih terfragmentasi. Kementerian yang bertanggung jawab untuk perencanaan (Bappenas), kebijakan sektoral (ESDM), pelatihan dan sertifikasi (Kementerian Tenaga Kerja dan Badan Nasional Sertifikasi Profesi), serta pendidikan (Kementerian Pendidikan Tinggi, Ilmu Pengetahuan dan Teknologi) beroperasi di bawah mandat yang terpisah, dengan koordinasi yang terbatas, sehingga meninggalkan kesenjangan dalam proyeksi tenaga kerja, standardisasi pekerjaan, dan implementasi program. Pembentukan platform terkoordinasi seperti Satuan Tugas Transisi Tenaga Kerja Energi akan membantu menyelaraskan mandat, anggaran, dan sistem pemantauan di seluruh kementerian. Pada saat yang sama, sebagian besar kompetensi khusus panas bumi masih kurang terdefinisi dengan baik dalam peta pekerjaan nasional dan SKKNI, yang menghambat pengembangan kurikulum dan membatasi penyelarasan di seluruh lembaga akademik dan kejuruan.

Rekomendasi yang ditawarkan dalam bab ini dapat menjadi landasan program transisi tenaga kerja nasional yang dapat diintegrasikan ke dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional Indonesia, Rencana Umum Energi Nasional, dan agenda transisi yang adil.

Yang dibutuhkan Indonesia saat ini adalah kemauan politik, keselarasan kelembagaan, dan investasi untuk menghubungkan aset-aset ini dengan masa depan energi bersih nasional. Jika diimplementasikan secara tegas, pendekatan ini dapat menjadikan Indonesia pemimpin regional dalam transformasi tenaga kerja hijau pada tahun 2035. Dengan mengambil langkah-langkah ini, Indonesia dapat memastikan bahwa transisi energinya tidak hanya layak secara teknologi dan ekonomi, tetapi juga inklusif secara sosial dan digerakkan oleh tenaga kerja.



REFERENSI

1 Antara News. (24 Oktober 2025). *Illuminating the future with geothermal power.* ANTARA News. https://en.antaranews.com/news/387789/illuminating-the-future-with-geothermal-power

2 Asosiasi Perminyakan Indonesia. (2017, 11 Januari). *Indonesia overview.* https://www.ipa.or.id/en/about/indonesia-overview

3 Satuan Tugas Khusus untuk Kegiatan Bisnis Hulu Minyak dan Gas (SKK Migas). (2023). Laporan *Tahunan 2023*. https://www.skkmigas.go.id/publication?tab=laporan%20tahunan

4 SKK Migas, 2023.

5 Badan Energi Internasional (IEA). (2025). *Pekerjaan di sektor energi dunia* 2024. https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2b4b054-4a55-4c6f-893f-fc2c8b77e9a1/WorldEnergyEmployment2024.pdf

6 Saha, D., Walls, G., Waskow, D., & Lazer, L. (2023). *Transisi yang adil di sektor minyak dan gas: Pertimbangan untuk mengatasi dampak pada pekerja dan masyarakat di negara-negara berpenghasilan menengah*. World Resources Institute. https://doi.org/10.46830/wriwp.21.00040

7 PwC. (2015). *Tantangan untuk era baru: Survei investor industri minyak dan gas Indonesia*. https://www.pwc.com/id/en/publications/assets/eumpublications/oilandgas/oil-and-gas-survey-2015.pdf

8 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (2012, 8 Juni). *Kembangkan Panas Bumi, Indonesia Memerlukan 3.000 Operator Terlatih dan 1.000 Orang Tenaga Pakar* https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/kembangkan-panas-bumi-indonesia-memerlukan-3000-operator-terlatih-dan-1000-orang-tenaga-pakar

9 PLN. (2025). *Rencana bisnis penyediaan listrik PLN (2025-2034): Meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan energi nasional*. Pemerintah Indonesia. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/b967d-ruptl-pln-2025-2034-pub-.pdf

10 Halimatussadiah, A., Irhamni, M., Riefky, T., Nur Ghiffari, M., & Razak Afifi, FA (2024). *Dampak transisi energi terhadap lapangan kerja di Indonesia*. Lembaga Penelitian Ekonomi dan Sosial Universitas Indonesia. https://en.lpem.org/employment-impacts-of-energy-transition-in-indonesia/

11 Halimatussadiah dkk., 2024.

12 Halimatussadiah dkk., 2024.

13 Douglas, J., Stuart, C., & Dwiyudha, H. (2021). Supporting sustainability in the Indonesian geothermal sector through new training methods for technicians and operators. In *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland. https://www.worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/09005.pdf

14 Bappenas. (nd). *Indonesia Emas 2045: Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2025–2045*. Pemerintah Indonesia. https://indonesia2045.go.id/

15 Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. (2025, 12 Agustus). *Pekerjaan hijau: Peluang dan tantangan dalam mewujudkan ekonomi berkelanjutan di Indonesia*. Kementerian Pendidikan Tinggi, Ilmu Pengetahuan dan Teknologi. https://lldikti5.kemdikbud.go.id/home/detailpost/green-jobs-peluang-dan-tantangan-dalam-mewujudkan-ekonomi-berkelanjutan-di-indonesia#:~:text=salah%20satu%20kunci%20untuk%20mengubah,tercipta%20sambil%20membantu%20menurunkan%20emisi

16 Bappenas. (2025). *Peta Jalan Pengembangan Tenaga Kerja Ramah Lingkungan di Indonesia*. Pemerintah Indonesia. https://perpustakaan.bappenas.go.id/e-library/file_upload/koleksi/dokumenbappenas/konten/Dokumen%202025/Konten/02-06-2025%20Fin%20Peta%20Jalan%20Pengembangan%20Tenaga%20Kerja%20Hijau%20Indonesia%20%5BISBN%5D.pdf

17 Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025, 25 Juli). *Peluncuran Peta Jalan Tenaga Kerja Spesialis untuk Transisi Energi Masa Depan Indonesia 2025–2060*. Pemerintah Indonesia. https://bpsdm.esdm.go.id/posts/2025/07/25/peluncuran-roadmap-tenaga-kerja-spesialis-untuk-transisi-energi-masa-depan-indonesia-2025-2060/3944; lihat juga Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 10 Tahun 2025 tentang Peta Jalan Transisi Energi Sektor Kelistrikan*. Pemerintah Indonesia. https://jdih.esdm.go.id/dokumen/download?id=2025pmesdm10.pdf

18 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia. (2025). *Dokumen kebijakan tentang pengembangan modal manusia dalam kerangka transisi energi menuju emisi nol bersih 2060*. Pemerintah Indonesia. https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/buka-hcs-2025-menteri-bahlil-instrumen-penyiapan-sdm-terbaik-sektor-esdm

19 Schulz, R., & Livescu, S. (2023). Chapter 5: The oil and gas industry role: Technology transfer, development, acceleration, and scale. In J. C. Beard & B. A. Jones (Eds.), *The future of geothermal in Texas: The coming century of growth and prosperity in the Lone Star State*. Project InnerSpace & Energy Institute, University of Texas at Austin. https://doi.org/10.26153/tsw/44081

20 Hochstein, MP, & Sudarman, S. (2008). *History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000. Geothermics, 37*(3), 220–266. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.01.001

21 Radja, VT (2000). Indonesian geothermal development in the national energy scenario. Development program to the year 2000. *Geothermics, 15* (5–6), 597–600. https://doi.org/10.1016/0375-6505(86)90069-6

22 Alhusni, H., Satria, T., Perdana, P., Purwanto, EH, & Setyawan, H. (2023). Geothermal business outlook in Indonesia. In *Proceedings of the 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2023/Habibi.pdf

23 Radja, 2000.

24 Hochstein & Sudarman, 2008.

25 International Energy Agency (IEA). (2024). *The future of geothermal energy*. https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy

26 Kekuatan MedcoEnergi. (nd). *Medco Cahaya Panas Bumi*. https://medcopower.co.id/id/project/medco-cahaya-geotermal/

27 Global Energy Monitor. (2025). *Pelacak tenaga panas bumi global*. https://globalenergymonitor.org/projects/global-geothermal-power-tracker/

28 Beard, J. C., & Jones, B. A. (Eds.). (2023). *The future of geothermal in Texas: The coming century of growth and prosperity in the Lone Star State*. Project InnerSpace & Energy Institute, University of Texas at Austin. https://energy.utexas.edu/research/geothermal-texas

29 Program Pelestarian Data Geologi dan Geofisika Nasional. (tanpa tanggal). *Mendigitalkan log sumur*. Survei Geologi AS. https://www.usgs.gov/index.php/programs/national-geological-and-geophysical-data-preservation-program/digitizing-well-logs

30 Badan Energi Internasional (IEA). (2024). Tinjauan sinergi antara industri minyak dan gas serta industri panas bumi. Dalam IEA, *Masa Depan Energi Panas Bumi*. https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy/overview-of-synergies-between-the-oil-and-gas-and-geothermal-industries

31 Departemen Energi AS. (2024) https://negpa.org/wp-content/uploads/2024/08/LIFTOFF_DOE_NextGen_Geothermal_v14.pdf

32 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (tanpa tanggal). *Repositori data Migas*. https://datamigas.esdm.go.id/home

33 International Association of Drilling Contractors (IADC). (2025). *IADC geothermal well classification*. https://iadc.org/wp-content/uploads/2025/02/IADC-Geothermal-Well-Classification-v1.pdf

34 Vivas, C., Salehi, S., Tuttle, J. D., & Rickard, B. (2020). Challenges and opportunities of geothermal drilling for renewable energy generation. *GRC Transactions*, 44, 904–918. https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1034261.pdf



35 McClure, M., & Horne, R. (2013). Is pure shear stimulation always the mechanism of stimulation in EGS? In *Proceedings of the Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2013/Mcclure.pdf

36 Li, N., Xie, H., Hu, J., & Li, C. (2022). A critical review of the experimental and theoretical research on cyclic hydraulic fracturing for geothermal reservoir stimulation. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 8*, 7. https://link.springer.com/article/10.1007/s40948-021-00309-7

37 Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savvy, J., & Wong, I. (2012). *Protocol for addressing induced seismicity associated with enhanced geothermal systems*. U.S. Department of Energy. https://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/geothermal_seismicity_protocol_012012.pdf

38 Richter, A. (2022, January 10). *ThinkGeoEnergy's top 10 geothermal countries 2021–installed power generation capacity (MWe)*. ThinkGeoEnergy. https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2021-installed-power-generation-capacity-mwe/

39 Okoroafor, E. R., Offor, C. P., & Prince, E. I. (2022). *Mapping relevant petroleum engineering skillsets for the transition to renewable energy and sustainable energy*. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Lagos, Nigeria. https://doi.org/10.2118/212040-MS

40 Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains dan Teknologi. (2025, 16 Maret). *Universitas politeknik diusulkan sebagai arah baru transformasi politeknik*. https://kemdiktisaintek.go.id/news/article/politeknik-university-diusulkan-jadi-arah-baru-transformasi-politeknik

41 Bappenas, 2025.

42 Program Magister Panas Bumi. (tanpa tanggal). *Sejarah*. Institut Teknologi Bandung. https://geothermal.itb.ac.id/background-2/

43 Istid'raj, S. (2025, 14 April). Daftar kampus dan jurusan teknik perminyakan di Indonesia. *Pelatihan Vokasi (blog)*. https://www.diklatkerja.com/blog/daftar-kampus-dan-jurusan-teknik-perminyakan-di-indonesia

44 Bata, F. (2025, 3 Juli). *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mengungkapkan energi panas bumi akan mempekerjakan 870.000 pekerja, mendorong perekonomian daerah*. Republik. https://esgnow.republika.co.id/berita/sytfxc490/esdm-ungkap-energi-panas-bumi-serap-870-ribu-tenaga-kerja-dorong-ekonomi-daerah

45 ESDM, 2012.

46 PLN, 2025.

47 International Energy Agency (IEA). (2023, August 2). *India's Skill Council for Green Jobs*. https://www.iea.org/policies/17819-indias-skill-council-for-green-jobs

48 European Commission. (n.d.). *What is ESCO?* https://esco.ec.europa.eu/en/about-esco/what-esco

49 IEA, 2023.



Bagian III

Tuas Kebijakan dan Jalur untuk Tata Kelola Pemangku Kepentingan dan Lingkungan yang Bertanggung Jawab



Bab 6

Jejak Bersama: Membangun Kepercayaan dan Transparansi dalam Transisi Energi Indonesia

Filda C. Yusgiantoro dan Michael Suryaprawira
Purnomo Yusgiantoro Center

Pengembangan energi panas bumi kerap dipandang semata-mata sebagai isu teknis—mengebor sumur, memasang turbin, membangun jaringan transmisi. Namun, di balik deretan rig pengeboran terdapat kisah yang jauh lebih kompleks. Suatu kisah yang melibatkan manusia, sejarah, kepentingan yang saling berkompetisi, dan konsekuensi jangka panjang. Panas bumi bukan hanya soal teknologi, tetapi juga soal tata kelola lahan, pembagian manfaat, serta bagaimana menavigasi ketegangan antara ambisi nasional dan realitas lokal.

Wilayah-wilayah Indonesia yang kaya potensi panas bumi sering kali berada di kawasan yang sensitif secara lingkungan atau budaya, dan dihuni oleh komunitas dengan latar belakang yang beragam dan saling beririsan—masyarakat adat, petani, komunitas pedesaan, serta pemerintah daerah. Semua kelompok ini memiliki kepentingan ketika sebuah proyek panas bumi mulai berjalan. Masing-masing membawa perspektif yang berbeda: ada yang melihat peluang, namun ada pula yang khawatir akan gangguan. Respons-respons ini bukan tanpa dasar; semuanya berakar pada pengalaman masa lalu terkait proyek-proyek ekstraktif.

Proyek panas bumi juga melibatkan suara dari universitas, organisasi masyarakat sipil, dan para peneliti—banyak di antaranya tengah mendorong batas-batas baru dalam bidang panas bumi. Para pemangku kepentingan ini meneliti reservoir, memikirkan kembali kerangka kebijakan, melatih para insinyur muda, serta mengaitkan energi panas bumi dengan isu-isu yang lebih luas tentang keadilan dan keberlanjutan.

Pemerintah daerah berada pada posisi yang unik. Mereka harus memediasi antara target nasional, para pemangku kepentingan dari berbagai organisasi, dan prioritas komunitas, sering kali dengan kapasitas atau kewenangan yang terbatas. Namun, peran mereka dapat sangat menentukan—apakah pembangunan akan berjalan cepat atau justru terhambat.

Sebagian besar pengembangan panas bumi di masa lalu, kini, dan yang telah direncanakan, berfokus pada



PERSYARATAN TINGKAT KOMPONEN LOKAL UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK PANAS BUMI DI INDONESIA

Kapasitas terpasang hingga 5 MW/unit:	1. Minimum TKDN untuk barang: 31,30% 2. Minimum TKDN untuk jasa: 89,18% 3. Minimum TKDN gabungan: 42,00%
Kapasitas terpasang lebih dari 10 MW hingga 60 MW/unit:	1. Minimum TKDN untuk barang: 15,70% 2. Minimum TKDN untuk jasa: 74,10% 3. MinimumDN gabungan: 33,24%
Kapasitas terpasang lebih dari 110 MW/unit:	1. Minimum TKDN untuk barang: 16,00% 2. Minimum TKDN untuk jasa: 58,40% 3. Minimum TKDN gabungan: 28,95%

Kapasitas terpasang lebih dari 5 MW hingga 10 MW/unit:	1. Minimum TKDN untuk barang: 21,00% 2. Minimum TKDN untuk jasa: 83,30% 3. Minimum TKDN gabungan: 40,45%
Kapasitas terpasang lebih dari 60 MW hingga 110 MW/unit:	1. Minimum TKDN untuk barang: 16,30% 2. Minimum TKDN untuk jasa: 60,10% 3. Minimum TKDN gabungan: 29,21%

Gambar 6.1: Persyaratan bagi pengembang panas bumi berdasarkan Undang-Undang Panas Bumi Tahun 2014. Barang mencakup turbin uap, boiler, generator, peralatan kelistrikan, instrumen dan sistem kendali, material pembangkit, serta struktur sipil dan baja. Jasa mencakup studi kelayakan, rekayasa (engineering), pengadaan, konstruksi, jasa inspeksi, pengujian, sertifikasi, dan jasa penunjang lainnya. MW = megawatt. Sumber: Audit Board of Indonesia. (2014).. Pemerintah Indonesia; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025).. Pemerintah Indonesia. Badan Pemeriksa Keuangan Republik Indonesia. (2014). *Law number 21 of 2014 concerning geothermal energy.* Pemerintah Indonesia; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *Performance report of the Directorate General of New, Renewable Energy and Energy Conservation (EBTKE) for 2024.* Pemerintah Indonesia.

pembangkit listrik konvensional yang dikenal sebagai tenaga hidrotermal. Saat ini, teknologi generasi berikutnya serta aplikasi direct use seperti panas industri dan sistem pendinginan berbasis geotermal memberikan dampak lingkungan yang lebih kecil. Sistem-sistem ini dapat beroperasi pada temperatur lebih rendah, lebih dekat dengan pusat permintaan, dan dengan jejak lahan yang lebih kecil. Dalam konteks ini, komunitas memiliki peluang yang lebih besar untuk memperoleh manfaat dari sumber daya panas bumi dibandingkan mengalami dampak negatif. Namun, agar manfaat tersebut benar-benar dirasakan oleh masyarakat, penting memastikan bahwa pengembangan dilakukan secara transparan, inklusif, dan selaras dengan seluruh pemangku kepentingan yang terlibat atau terdampak oleh instalasi sistem panas bumi.

Bab ini berfokus pada orang-orang dan institusi yang terlibat dalam pengembangan panas bumi, bagaimana mereka berinteraksi dengan proses tersebut, dan bagaimana peran mereka pada akhirnya membentuk masa depan sektor ini. Dengan mempertemukan beragam perspektif, bab ini bertujuan memberikan gambaran yang lebih utuh tentang apa yang sebenarnya dipertaruhkan ketika kita berbicara tentang panas bumi—bukan hanya elektron, tetapi juga kesetaraan; bukan hanya potensi, tetapi juga partisipasi.

Rekomendasi yang disampaikan pada bagian akhir bab ini menekankan bahwa penguatan keterlibatan masyarakat, peningkatan mekanisme pembagian manfaat, dan integrasi panas bumi generasi berikutnya merupakan kunci untuk menciptakan industri panas bumi yang melayani seluruh masyarakat Indonesia.

KEMANA DANA MENGALIR: TATA KELOLA DIVIDEN PANAS BUMI

Ketika proyek panas bumi—termasuk proyek generasi berikutnya dan aplikasi *direct use*—berpindah dari tahap eksplorasi menuju operasi komersial, pendapatan yang dihasilkan melalui royalti, pajak, dan bonus menjadi bentuk dividen panas bumi yang, jika dikelola dengan baik, dapat mentransformasi komunitas. Tantangannya terletak pada memastikan bahwa dividen ini dikelola secara transparan dan dialokasikan secara adil.

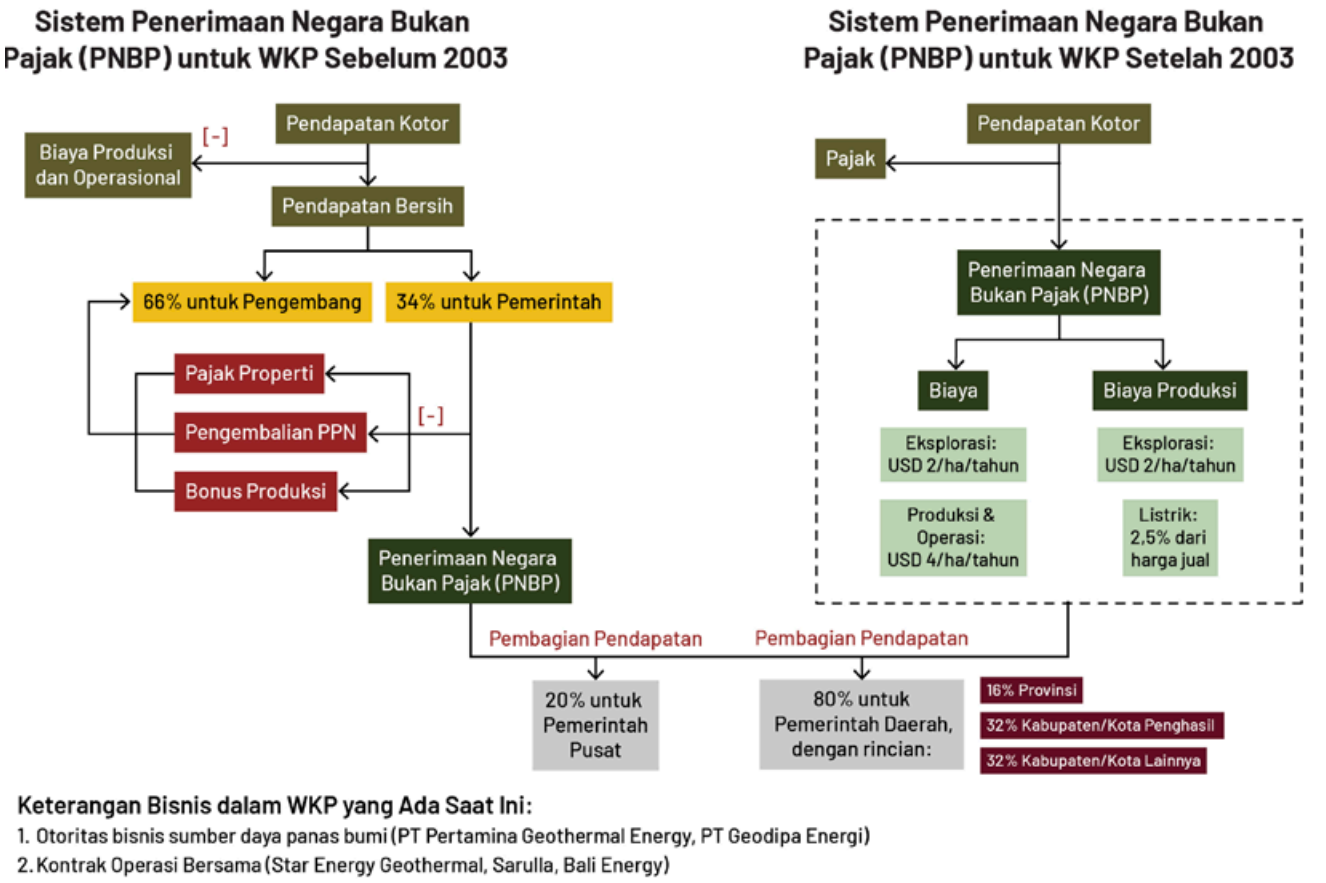


Bagian ini membahas kerangka hukum yang mengatur penerimaan negara dari panas bumi serta kewajiban para pemegang izin panas bumi. Bagian ini juga menganalisis bagaimana mekanisme yang ada berjalan dan mengidentifikasi area yang memerlukan peningkatan koordinasi dan tata kelola agar dampak pendapatan tersebut dapat diperbesar.

Landasan Hukum dan Kewajiban Pemegang Izin

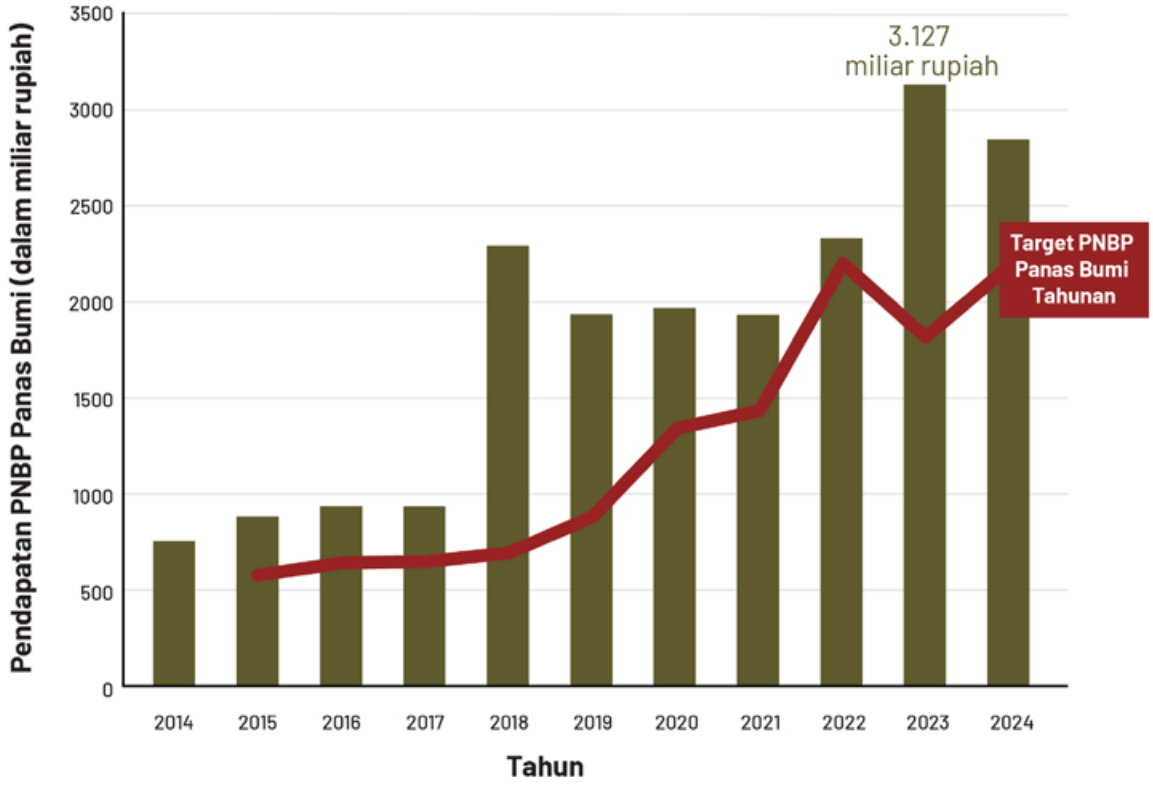
Tata kelola penerimaan panas bumi di Indonesia berlandaskan pada Undang-Undang Nomor 21 Tahun 2014[1] tentang Panas Bumi dan dijabarkan lebih lanjut ke dalam sejumlah peraturan kunci sebagai berikut:

- Peraturan Pemerintah Nomor 28 Tahun 2016 tentang Besaran dan Tata Cara Pemberian Bonus Produksi Panas Bumi[2]
- Peraturan Pemerintah Nomor 7 Tahun 2017 tentang Panas Bumi untuk Pemanfaatan Tidak Langsung[3]
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 37 Tahun 2018 tentang Penawaran Wilayah Kerja Panas Bumi, Pemberian Izin Panas Bumi, dan Penugasan Usaha Panas Bumi[4]
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 33 Tahun 2021 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, serta Pedoman Teknis Panas Bumi untuk Pemanfaatan Tidak Langsung[5]



Gambar 6.2: Saat ini terdapat dua jenis Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP). WKP pertama berlaku untuk pembangkit yang telah beroperasi sebelum tahun 2003, ketika Undang-Undang Nomor 27 diberlakukan; WKP kedua berlaku untuk pembangkit yang mulai beroperasi setelah tahun 2003. Ha = hektare; VAT = value-added tax (Pajak Pertambahan Nilai). Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *2024 Directorate General of Renewable Energy and Energy performance report.* Pemerintah Indonesia.

PENERIMAAN NEGARA BUKAN PAJAK (PNBP) PANAS BUMI



Gambar 6.3: Pada periode 2014–2024, sektor panas bumi telah menyumbang sekitar Rp19,9 triliun atau USD 1,2 miliar terhadap Penerimaan Negara Bukan Pajak (PNBP) panas bumi Indonesia. PNBP = non-tax state revenue. Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *2024 Directorate General of New, Renewable and Energy Conservation performance report.* Pemerintah Indonesia; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2019). *2014–2019 performance report of the Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral of the Republic of Indonesia.* Pemerintah Indonesia; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2021). *2020 performance report of the Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.* . Pemerintah Indonesia; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022). *2021 performance report of the Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.* Pemerintah Indonesia; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). *2022 performance report of the Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*. Pemerintah Indonesia; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). *2023 performance report of the Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.* Pemerintah Indonesia; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *2024 performance report of the Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.* Pemerintah Indonesia.

Pemegang izin pemanfaatan panas bumi—yang secara resmi diakui dalam kerangka perizinan Indonesia sebagai pemegang Izin Panas Bumi (IPB)—memiliki tanggung jawab yang jauh melampaui pembangunan dan pengoperasian pembangkit. Pemerintah Indonesia menempatkan para pemegang IPB sebagai agen pembangunan sosial-ekonomi, yang diharapkan tidak hanya berinvestasi pada infrastruktur, tetapi juga pada manusia, komunitas, serta ekosistem yang lebih luas.[6]

Pemegang IPB memiliki kewajiban penting untuk mendukung pengembangan industri dan tenaga kerja dalam negeri. Mereka wajib memprioritaskan penggunaan barang dan jasa lokal (ketentuannya ditunjukkan pada **Gambar 6.1** mengenai persyaratan tingkat komponen dalam negeri[7]) atau jika pengadaan lokal tidak memungkinkan, mereka harus memastikan bahwa produk impor dan tenaga kerja asing memenuhi standar mutu.

Di luar pengadaan, pemegang IPB diharapkan berinvestasi dalam penelitian dan pengembangan panas bumi, bekerja sama dengan institusi akademik, serta memfasilitasi pertukaran pengetahuan—sering kali melalui studi bersama, akses laboratorium, atau program benchmarking ke luar negeri—untuk memperkuat kapasitas keahlian di dalam negeri.

Pemegang IPB juga memiliki kewajiban penting untuk mendukung kegiatan Pengembangan dan Pemberdayaan Masyarakat (PPM). Mereka wajib menyampaikan program kepada pemerintah daerah dengan memprioritaskan komunitas yang berada di sekitar lokasi proyek, mencakup dukungan pada kesempatan kerja lokal, penyediaan jasa, serta pemenuhan kebutuhan dasar seperti pendidikan, kesehatan, dan infrastruktur.[8] Program mereka harus selaras dengan rencana pembangunan daerah dan dilaksanakan selama tahap operasi proyek.

Meskipun mandatnya jelas, pelaksanaan di lapangan menunjukkan hasil yang beragam. Pemantauan masih tidak konsisten, data terkait hasil kegiatan bersifat terfragmentasi, dan mekanisme evaluasi belum berkembang secara memadai. Sebagian besar perusahaan dan pemerintah daerah belum memasukkan sistem *monitoring, evaluation, and learning* (MEL) dalam pelaksanaan PPM. Kondisi ini membuat efektivitas program sulit dinilai dan praktik baik sulit direplikasi. Selain itu, koordinasi antara pemerintah dan perusahaan sering bersifat reaktif, bukan strategis, sehingga menimbulkan inefisiensi dan hilangnya peluang penguatan dampak.

Arus Penerimaan dari Proyek Panas Bumi Saat Ini

Pengembalian finansial dari sektor panas bumi dapat sangat signifikan. Setelah proyek memasuki fase produksi, pemerintah pusat dan daerah mulai menerima pendapatan melalui biaya tetap dan biaya produksi yang dibayarkan oleh pemegang IPB, sesuai ketentuan dalam kontrak IPB masing-masing. Pembayaran ini dilengkapi dengan kewajiban pajak standar seperti Pajak Bumi dan Bangunan (PBB) serta Pajak Pertambahan Nilai (PPN), dan juga satu kategori yang sangat penting: Penerimaan Negara Bukan Pajak (PNBP). PNBP mencakup biaya tetap (US$2,00 per hektare pada tahap eksplorasi dan US$4,00 per hektare setelah *Commercial Operation Date*) serta biaya produksi (5% per kilowatt-jam untuk uap dan 2,5% per kilowatt-jam untuk listrik). Keduanya membentuk salah satu sumber penerimaan fiskal paling besar dan paling langsung dari proyek panas bumi.[9] Selain itu, pemegang izin juga membayar biaya administrasi, biaya perizinan, dan pungutan lain yang ditetapkan pemerintah sebagai bagian dari kewajiban kepatuhan.

Saat ini, pemerintah memungut biaya berdasarkan pembangkit dan tahun pembangunannya. Gambar 6.2 menunjukkan perbedaan antara dua tipe Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP). WKP pertama berlaku untuk pembangkit yang beroperasi sebelum tahun 2003, ketika Undang-Undang Nomor 27 diberlakukan; WKP ini menyumbang sekitar 90% PNBP panas bumi. WKP kedua berlaku untuk pembangkit yang mulai beroperasi setelah 2003 dan menyumbang sekitar 10% PNBP saat ini.[10] Antara tahun 2014 dan 2024, sektor panas bumi telah menyumbang sekitar Rp19,9 triliun atau sekitar US$1,2 miliar terhadap PNBP panas bumi Indonesia (lihat Gambar 6.3).[11,12,13,14,15,16]

Royalti: Siapa yang Mendapat Manfaat?

Berlawanan dengan persepsi umum, sebagian besar penerimaan panas bumi Indonesia tidak tertahan di Jakarta. Dalam skema pembagian penerimaan yang berlaku saat ini, 80% dari pendapatan yang dikenal sebagai Dana Bagi Hasil (DBH) dialokasikan kepada pemerintah daerah, sementara pemerintah pusat mempertahankan 20% dari Penerimaan Negara Bukan Pajak (PNBP) panas bumi.

Porsi 80% tersebut dimaksudkan sebagai bentuk penghargaan dan dukungan bagi daerah yang menjadi lokasi infrastruktur panas bumi—wilayah yang sering kali menanggung dampak lingkungan dan sosial dari pembangunan tersebut. Alokasi ini juga mencerminkan komitmen besar terhadap agenda desentralisasi fiskal.

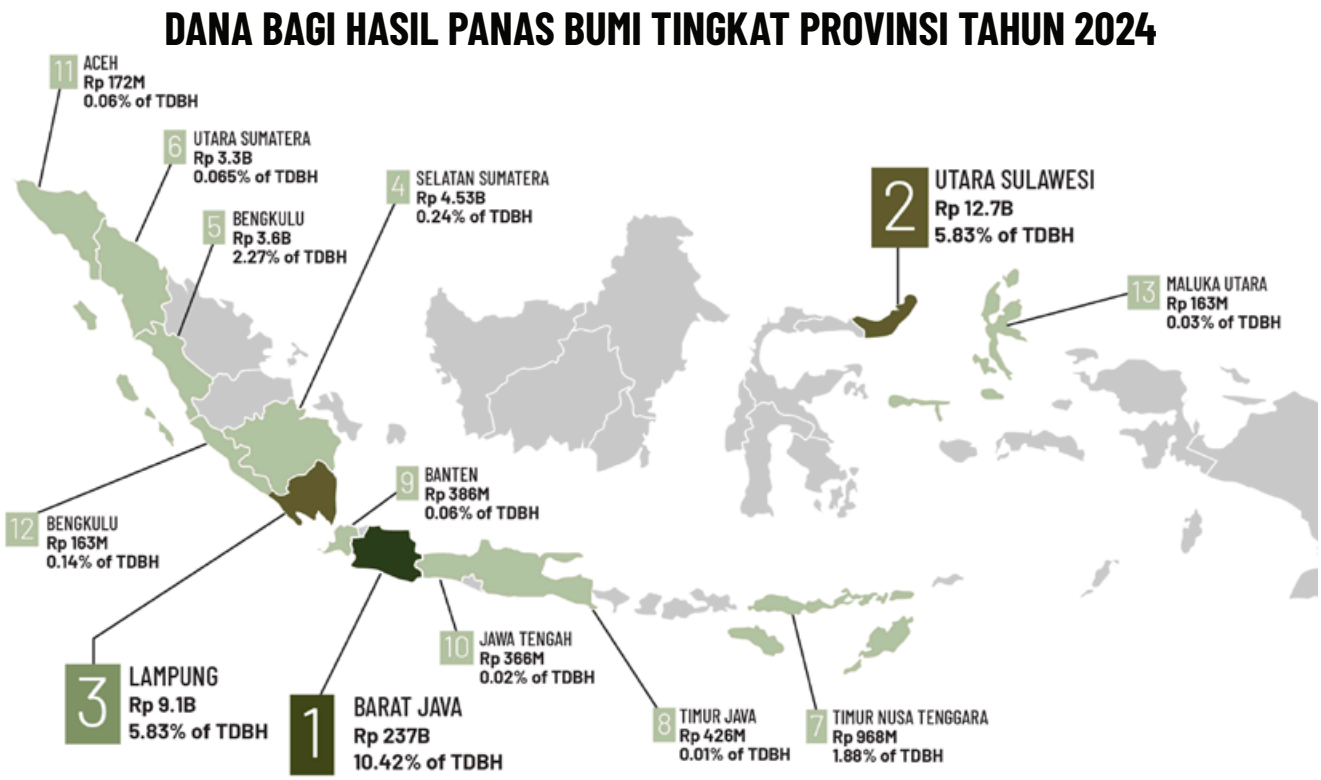
Sebagai contoh, di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang yang berlokasi di Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat:

- 16% disalurkan kepada Pemerintah Provinsi Jawa Barat
- 32% diberikan kepada Pemerintah Kota Bandung
- 32% sisanya didistribusikan secara merata kepada 26 kota/kabupaten lainnya di Jawa Barat

Gambar 6.4 menampilkan 13 provinsi dengan jumlah Dana Bagi Hasil panas bumi terbesar.[17]

Meskipun alokasi dana dapat diukur, pemanfaatan akhirnya jauh lebih sulit untuk ditelusuri. Indonesia





Gambar 6.4: Dana Bagi Hasil (DBH) panas bumi per provinsi pada tahun 2024 dan persentasenya terhadap total Dana Bagi Hasil (TDBH). Sumber: Direktorat Jenderal Perimbangan Keuangan, Kementerian Keuangan Republik Indonesia (2023). *Details of the allocation of the General Allocation Fund and Revenue Sharing Fund for fiscal year 2024.* Pemerintah Indonesia. Diproses oleh Purnomo Yusgiantoro Center.

belum memiliki kerangka terpadu dan transparan yang dapat mengaitkan penerimaan panas bumi dengan strategi pembangunan yang lebih luas. Sebagian besar dana—baik yang bersumber dari pajak pusat maupun pungutan daerah—masuk ke dalam anggaran umum. Setelah tergabung di dalamnya, penerimaan tersebut menjadi sulit untuk diisolasi, dipantau, atau dievaluasi kontribusinya secara spesifik terhadap wilayah yang terdampak panas bumi.

Tanpa mekanisme pelacakan tersebut, penerimaan panas bumi berisiko menjadi sekadar satu pos anggaran, bukan alat pembangunan. Akibatnya, masyarakat lokal mungkin melihat uap dari pembangkit, tetapi tidak merasakan manfaat dari dividen fiskal, menempatkan wilayah kaya panas bumi pada paradoks kekayaan energi namun tetap terbelakang. Dengan kata lain, meskipun penerimaan dibagi, dampaknya saat ini tidak terlihat dan tidak dapat ditelusuri oleh komunitas penghasil.

Agar panas bumi benar-benar memenuhi janjinya sebagai sumber energi bersih dan kesejahteraan lokal, diperlukan kerangka pengelolaan penerimaan panas bumi yang khusus, dengan persyaratan penggunaan anggaran yang transparan serta mekanisme perencanaan partisipatif. Upaya tersebut sangat penting untuk membangun kembali kepercayaan antara masyarakat, perusahaan, dan negara. LIhat Rekomendasi Kebijakan #9 di Bab 7, Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia untuk detail lebih lanjut.

MASYARAKAT: PEMANGKU KEPENTINGAN UTAMA DAN KOMUNITAS TERDAMPAK

Komunitas Pedesaan dan Berpendapatan Rendah

Pengembangan energi panas bumi di Indonesia sering dibingkai melalui perspektif geologi, pembiayaan, dan kebijakan. Namun, dimensi sosial yang membentuk persepsi masyarakat terhadap proyek tidak kalah penting. Dalam praktiknya, ekspansi panas bumi bukan sekadar

penyedia energi bersih; ia merupakan proses sosial yang bersinggungan dengan sistem tenurial lahan, nilai budaya, mata pencaharian lokal, dan kepercayaan publik.

Dalam model pengembangan di masa depan, pemanfaatan langsung panas bumi (direct use) dapat memberikan manfaat yang lebih nyata dan tidak terlalu mengganggu bagi masyarakat lokal. Penyediaan panas yang bersih dan terjangkau untuk pengolahan, pertanian, dan layanan komunitas, atau penyediaan pendinginan untuk bangunan dan pariwisata, dapat membuat aktivitas panas bumi lebih selaras dengan prioritas ekonomi loka.

Potensi panas bumi Indonesia merupakan salah satu yang tertinggi di dunia, namun pemanfaatannya masih tidak merata. Di berbagai wilayah—mulai dari Sumatra Utara hingga Nusa Tenggara Timur—berbagai proyek menghadapi resistensi kuat dari masyarakat, mulai dari aksi protes damai hingga penghentian penuh proyek (lihat **Gambar 6.5**). Memahami lokasi dan akar munculnya ketegangan dalam proyek-proyek sebelumnya dapat membantu merancang pengembangan yang lebih inklusif dan berkelanjutan ke depan.

Konflik sosial dalam pengembangan panas bumi jarang muncul karena satu pemicu tunggal. Sebaliknya, konflik biasanya merupakan akumulasi dari kekhawatiran teknis, lingkungan, ekonomi, dan budaya yang tidak ditangani sejak tahap awal proyek.[18] Penelitian yang dilakukan oleh Purnomo Yusgiantoro Center (PYC) menunjukkan bahwa isu-isu tersebut umumnya mengelompok pada empat persoalan inti: ambiguitas tenurial lahan dan kurangnya konsultasi; persepsi risiko lingkungan; disrupsi ekonomi dan minimnya manfaat lokal; serta dampak terhadap nilai budaya dan spiritual.

Ambiguitas Tenurial Lahan dan Kurangnya Konsultasi

Di banyak lokasi proyek, komunitas dengan sistem wilayah adat sering merasa bahwa hak dan klaim mereka diabaikan. Sistem ini melibatkan lahan yang secara historis dimiliki dan dikelola oleh masyarakat adat yang telah tinggal selama ribuan tahun. Pengembang memang dapat memperoleh izin resmi dari pemerintah untuk mengoperasikan kegiatan di wilayah tersebut, tetapi masyarakat setempat mungkin tidak mengakui legitimasi izin tersebut apabila mereka tidak diajak berkonsultasi dalam prosesnya. Ketidakselarasan ini telah memicu ketidakpercayaan terhadap pengembang dan mendorong penolakan terhadap proyek.[19]

Persepsi Risiko Lingkungan

Komunitas secara konsisten menyampaikan kekhawatiran mengenai penggunaan dan keselamatan sumber daya alam, terutama kualitas air dan udara. Kegiatan pengeboran, pembuangan fluida, dan potensi emisi tak sengaja dianggap dapat mengancam kesehatan, pertanian, dan ekosistem. Bahkan ketika risikonya rendah atau dikelola dengan baik, komunikasi yang buruk dapat memperburuk kecemasan publik. (Lihat Bab 8, Harmoni dalam Panas: Melindungi Alam dan Komunitas dalam Generasi Berikutnya dari Pengembangan Panas Bumi.)

Disrupsi Ekonomi dan Minimnya Manfaat Lokal

Proyek panas bumi dapat dipersepsikan sebagai kegiatan ekstraktif alih-alih inklusif apabila warga tidak memperoleh kesempatan kerja yang bermakna, peningkatan kapasitas, atau mekanisme pembagian manfaat. Banyak lokasi panas bumi berada di wilayah pertanian, tempat warga menggantungkan hidup pada kebun atau sawah. Lahan yang diakusisi untuk infrastruktur pengeboran sering kali mengurangi akses masyarakat terhadap lahan produktif tersebut. Meski kompensasi dapat diberikan, nilainya jarang dapat menutupi dampak ekonomi dan sosial sepenuhnya, terlebih jika warga tidak dapat beralih ke pekerjaan baru dalam proyek. Ketidakseimbangan antara disrupsi ekonomi dan peluang kerja inilah yang kerap menyulitkan penerimaan masyarakat.[20]

Dampak Budaya dan Spiritual

Zona panas bumi sering berada di dalam atau dekat lanskap yang memiliki nilai budaya tinggi. Pembangunan di sekitar situs suci, hutan adat, atau area pemakaman dapat memicu resistensi yang berakar kuat pada identitas dan tradisi lokal. Kegagalan pengembang untuk mengenali atau menyesuaikan diri dengan sensitivitas ini dapat dengan cepat mengikis dukungan publik.



ISU-ISU MASYARAKAT YANG TERKAIT DENGAN PROYEK LISTRIK PANAS BUMI DI INDONESIA

No.	Project	Location	Time	Community Concern
1	Tabanan (PT Pertamina Geothermal Energy dan Bali Energy, Ltd.)	Bali	Aug. 2005	**Budaya:** Gangguan pada tempat suci akibat aktivitas proyek. **Lingkungan:** Kelangkaan sumber air dan kontaminasi; gangguan terhadap pelestarian ekosistem.
2	Ulubelu (PT Pertamina Geothermal Energy & PT Supreme Energy)	Lampung	May 2013	**Budaya:** Gangguan terhadap tempat-tempat bersejarah (makam). **Lingkungan:** Kelangkaan sumber air dan kontaminasi. **Ekonomi:** Ancaman terhadap mata pencaharian masyarakat sekitar.
3	Tangkuban Perahu (PT Tangkuban Perahu Geothermal Power)	Jawa Barat	Nov. 2013	**Lingkungan:** Kelangkaan sumber air dan kontaminasi; bencana alam akibat ulah manusia (banjir dan longsor)
4	Sarulla (PT Medco Power & PT Ormat)	Sumatra Utara	Dec. 2014	**Lingkungan:** Gangguan terhadap pelestarian ekosistem; risiko pemboran terhadap masyarakat (H_2S dan kebisingan).
5	Gunung Salak (PT Chevron Geothermal Energy)	Jawa Barat	March 2015	**Lingkungan:** Kelangkaan air dan kontaminasi; dampak terhadap kesehatan masyarakat.
6	Dieng (PT Pertamina Geothermal Energy)	Jawa Tengah	Nov. 2016–Oct. 2017	**Lingkungan:** Gangguan terhadap ekosistem dan kontaminasi sumber air; bencana alam akibat ulah manusia (banjir dan longsor). **Ekonomi:** Ancaman terhadap kawasan wisata lokal.
7	Sokoria (PT Sokoria Geothermal Indonesia)	Nusa Tenggara Timur	Feb. 2017	**Ekonomi:** Transparansi dan mekanisme perolehan lahan dianggap tidak memadai.
8	Gunung Talang (PT Hitay Daya Energy)	Sumatra Barat	Nov. 2017	**Lingkungan:** Kelangkaan dan kontaminasi sumber air; risiko pemboran terhadap masyarakat; ancaman terhadap keselamatan; potensi kegagalan pengembangan PLTP. **Ekonomi:** Risiko terhadap kegiatan pertanian lokal.
9	Mount Lawu (PT Pertamina Geothermal Energy)	Jawa Tengah	Jan. 2018	**Budaya:** Gangguan pada tempat suci akibat aktivitas proyek. **Lingkungan:** Gangguan terhadap ekosistem akibat penebangan; kelangkaan air dan bencana alam akibat ulah manusia. **Ekonomi:** Manfaat minimal dari proyek panas bumi bagi masyarakat.
10	Kawah Danau Banteng (PT Seleraya Merangin Dua)	Banten	March 2020	**Lingkungan:** Gangguan terhadap pelestarian ekosistem.
11	Bitung (PT Pertamina Geothermal Energy)	Sulawesi Selatan	Jan. 2021	**Budaya:** Gangguan terhadap adat istiadat (wilayah adat). **Ekonomi:** Ancaman terhadap mata pencaharian masyarakat. **Lingkungan:** Kelangkaan sumber air.
12	Tampomas (PT Wijaya Karya Jabar Power & Kyushu Electric Power)	Jawa Barat	March 2021	**Lingkungan:** Gangguan terhadap pelestarian ekosistem dan kontaminasi; risiko sosial dan ekonomi, termasuk ketidakstabilan tanah akibat pemboran.
13	Oka Ile Ange (PT Energi Baru Tana Kusu)	Nusa Tenggara Timur	Jan. 2022	**Lingkungan:** Risiko terhadap desa terdekat; risiko pemboran terhadap masyarakat (H_2S dan kebisingan).
14	Wae Sano (Geothermal BUMD)	Nusa Tenggara Timur	Feb. 2022	**Budaya:** Gangguan terhadap desa adat dan rumah adat. **Lingkungan:** Risiko terhadap desa sekitar; kelangkaan sumber air. **Ekonomi:** Ancaman terhadap potensi pertanian lokal.

Gambar 6.5: Isu-isu komunitas di Indonesia yang terkait dengan proyek pembangkit listrik panas bumi, berdasarkan referensi historis. Sumber: Fadhillah, F. R., Al Asy'ari, M. R., Bagaskara, A., Valley Vie Vanda, D., Adityatama, D. W., Purba, D., Katmoyo, R., Djandam, A., & Gurning, L. (2023). Challenges in getting public acceptance on geothermal project in Indonesia. In *Proceedings, 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States.



TANTANGAN SOSIAL YANG TERORGANISASI BERDASARKAN TAHAP PROYEK PANAS BUMI

Tahap Proyek Panas Bumi	Kegiatan	Dampak Potensial	Kekhawatiran & Persepsi Masyarakat
Tahap Awal dan Survei	Survei LiDAR; Pemetaan lapangan; Pengumpulan data dan sampel; Pengukuran geofisika; Survei infrastruktur awal dan kajian geohazard	Pembukaan lahan skala kecil; Masuk tanpa izin ke lahan lokal; Mengganggu aktivitas masyarakat; Meningkatkan rasa ingin tahu masyarakat	Persepsi relatif netral; Pengambilan sampel dapat mengganggu aktivitas masyarakat lokal; Kegiatan sering dikaitkan dengan sumber daya air, pariwisata lokal, dan tempat sakral
Persiapan Infrastruktur dan Pengeboran	Survei infrastruktur rinci dan geoteknik; Pengadaan lahan; Pembukaan lahan besar-besaran; Pekerjaan sipil dan mobilisasi alat berat; Pengumpulan pasokan air; Relokasi dan pembuangan; Pengeboran dan pengujian sumur	Deforestasi; Perubahan pola mata pencaharian lokal; Pencemaran tanah; Pencemaran udara; Sosialisasi dengan tenaga kerja asing	Ketakutan hewan liar masuk desa dan gangguan ekosistem; Gangguan akibat pembebasan lahan; Mobilisasi alat berat mengganggu lalu lintas; Polusi udara, tanah, dan limbah; Polusi air akibat pengeboran; Hilangnya mata pencaharian; Gangguan budaya; Risiko H2S dan kejadian blowout
Tahap Konstruksi	Survei infrastruktur rinci dan geoteknik lanjutan; Pembangunan fasilitas utilitas; Pengadaan lahan; Mobilisasi alat berat; Interaksi sosial dengan tenaga kerja asing; Pemasangan Sistem Pembuangan Gas Panas Bumi (SAGGS)	Deforestasi; Pencemaran tanah; Polusi udara; Polusi suara; Interaksi sosial dengan tenaga kerja asing	Polusi udara, air, dan suara; Gangguan terhadap aktivitas sosial lokal; Kekhawatiran bahwa tenaga kerja asing dapat mengganggu ketertiban; Gangguan terhadap kehidupan sosial masyarakat sekitar
Tahap Produksi	Pengeboran sumur *make-up*; Pengeboran sumur injeksi; Mobilisasi alat berat	Interaksi sosial dengan tenaga kerja asing; Perubahan mata pencaharian lokal; Kebisingan; Polusi suara dari fluida panas bumi	Hilangnya mata pencaharian; Longsor akibat aktivitas manusia; Perubahan penggunaan lahan; Perubahan nilai sosial di wilayah sekitar

Gambar 6.6: Tantangan sosial yang dihadapi pada setiap tahap proyek panas bumi. Sumber: Fadhillah, F. R., Al Asy'ari, M. R., Bagaskara, A., Valley Vie Vanda, D., Adityatama, D. W., Purba, D., Katmoyo, R., Djandam, A., & Gurning, L. (2023). Challenges in getting public acceptance on geothermal project in Indonesia. In *Proceedings, 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States.

Contohnya, PT Pertamina Geothermal Energy dan Bali Energy Limited memulai pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Bedugul pada 1990-an di Kompleks Vulkanik Buyan-Bratan, Bali. Meskipun perusahaan-perusahaan tersebut telah memperoleh izin, penolakan publik yang kuat berlandaskan keyakinan keagamaan menghentikan proyek. Banyak umat Hindu Bali menganggap pegunungan—terutama kawasan Bedugul—sebagai kawasan suci. Gagasan untuk mengebor area yang secara spiritual penting tersebut memicu penolakan luas dari masyarakat lokal, kelompok lingkungan, pemerintah provinsi, dan lembaga-lembaga keagamaan.[21] Lembaga adat dan keagamaan di banyak wilayah Indonesia memiliki pengaruh besar terhadap komunitas, bahkan melampaui pemerintah daerah.

Tujuannya praktis: menjelaskan siapa melakukan apa, pada tahap apa, dengan indikator yang dapat diverifikasi serta mekanisme pengaduan yang tetap berjalan agar komitmen tidak bergantung pada pergantian kepemimpinan dan dapat berlanjut dari tahap eksplorasi hingga operasi. Berikut empat titik masalah yang paling sering muncul dan langkah-langkah yang secara konsisten mampu mengurangi risikonya.



MASALAH DAN SOLUSI, DISAMPAIKAN SECARA SEDERHANA

Ambiguitas Tenurial Lahan dan Kurangnya Konsultasi

- **Masalah:** Pengabaian hak dan klaim wilayah adat.
- **Solusi potensial:** Menerapkan prinsip *Persetujuan Bebas, Sebelumnya, dan Berinformasi* (FPIC) dengan pemetaan partisipatif yang secara hukum mencatat batas-batas adat dan menetapkan perjanjian penggunaan lahan yang ditandatangani bersama para pemimpin adat. Membentuk forum komunikasi masyarakat yang bersifat permanen dan mekanisme pengaduan dengan mediasi independen untuk menyelesaikan sengketa.

Persepsi Risiko Lingkungan

- **Masalah:** Kekhawatiran masyarakat mengenai penggunaan dan keselamatan sumber daya alam.
- **Solusi potensial:** Mempublikasikan data dasar (*baseline*) dan pemantauan berkelanjutan kualitas udara dan air melalui dasbor daring waktu nyata, diverifikasi oleh auditor independen. Menyusun rencana tanggap darurat bersama masyarakat dan melakukan latihan rutin. Menggunakan bahasa yang mudah dipahami dan menetapkan ambang batas penghentian pekerjaan (*stop-work thresholds*) yang terkait dengan indikator pemantauan.

Disrupsi Ekonomi dan Minimnya Manfaat Lokal

- **Masalah:** Persepsi bahwa panas bumi bersifat ekstraktif, bukan inklusif.
- **Solusi potensial:** Menerapkan *Livelihood Restoration Plan* yang mencakup pelatihan dan target perekrutan lokal, pengembangan pemasok untuk usaha kecil dan menengah desa, serta pembayaran jembatan pendapatan (*income-bridge payments*) hingga pekerjaan baru stabil. Mengalokasikan dana manfaat komunitas atau dana berbagi pendapatan (*revenue sharing*), serta mendukung pertanian cerdas iklim untuk meningkatkan produktivitas lahan yang tersisa.

Dampak Budaya dan Spiritual

- **Masalah:** Pembangunan panas bumi di dalam atau sekitar lingkungan budaya atau alam yang sensitif yang dapat mengikis dukungan publik.
- **Solusi potensial:** Melakukan *Cultural Heritage Impact Assessment* bersama otoritas terkait dan membuat zona penyangga untuk melindungi kawasan tertentu; merancang ulang atau memindahkan aset bila diperlukan. Meresmikan protokol akses, pelaksanaan ritual dan upacara, serta tata kelola bersama lanskap sakral dalam suatu perjanjian tertulis.



MENUJU KEMITRAAN YANG LEBIH SEHAT

Di Indonesia, keberhasilan proyek panas bumi sangat bergantung pada *izin operasi sosial* (SLO) yang diberikan oleh komunitas tuan rumah, bukan semata-mata oleh regulator. Para "pemberi izin sosial" ini terutama adalah warga sekitar: pemilik lahan dan petani, kelompok suku adat, kepala desa dan perangkat desa, tokoh agama, kelompok perempuan, organisasi pemuda, serta usaha kecil dan menengah lokal. Para pemberi SLO menilai proyek berdasarkan hal-hal konkret: akses dan kompensasi lahan yang adil, perekrutan lokal dan pengembangan pemasok, mitigasi dampak pengeboran, transparansi, serta mekanisme pembagian manfaat yang sesuai dengan prioritas desa. Jika pengembang menyesuaikan program pemberdayaan dengan rencana pembangunan daerah dan forum lokal serta memenuhi ekspektasi terhadap penggunaan komponen lokal sejak awal, proyek dapat terhindar dari protes dan penghentian.[22]

Salah satu pemberi SLO paling penting adalah kelompok suku adat. Dengan lebih dari 1.300 budaya adat berbeda di Indonesia, banyak prospek panas bumi berada di atas atau dekat wilayah adat yang telah dikelola selama beberapa generasi.[23] Keputusan tentang lokasi jalan, *well-pad*, pipa, atau kolam dapat memengaruhi akses ke hutan dan mata air, mengganggu tempat-tempat sakral, dan mengubah rutinitas harian komunitas adat.

Komunitas-komunitas ini biasanya memiliki aturan sosial yang jelas meskipun lahan mereka belum sepenuhnya tersertifikasi oleh negara. Kepemimpinan dapat mencakup dewan adat, kepala marga, tetua yang dihormati, kelompok perempuan, pemuda, dan tokoh agama. Mata pencaharian bergantung pada hasil hutan, pertanian kecil, perikanan, serta pekerjaan musiman terkait mata air, kebun, atau kawasan perburuan. Budaya juga terikat pada tempat—seperti kuburan leluhur, pohon ritual, gua, dan jalur berjalan kaki—sehingga proyek harus merencanakan zona penyangga untuk melindungi area tersebut. (Untuk dampak pada tiap fase proyek, lihat Bab 8, Harmoni dalam Panas: Melindungi Alam dan Komunitas dalam Generasi Berikutnya dari Pengembangan Panas Bumi.)

Indonesia memiliki aturan yang memberikan jalur bagi pengelolaan wilayah adat agar dapat hidup berdampingan dengan pengembangan panas bumi. Konstitusi mengakui hak-hak implisit Masyarakat Hukum Adat (nama formal untuk suku adat) sejauh tidak bertentangan dengan kepentingan publik yang lebih luas. Undang-undang lingkungan mewajibkan Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), yang mencakup penilaian dampak sosial dan mekanisme pengaduan. Wilayah adat dapat diakui melalui peraturan daerah dan pemetaan partisipatif, dan dapat diformalisasi melalui ketentuan kehutanan. Perizinan panas bumi dan regulasi turunannya mengharuskan adanya pelibatan masyarakat dan program pengembangan komunitas, serta mendorong penggunaan barang dan jasa lokal.

Jika pengembang menangani isu-isu ini sejak awal, menjelaskan rencana dengan jelas, dan menyiapkan manfaat yang adil, proyek akan berjalan lebih lancar dan kepercayaan meningkat dari kedua belah pihak. Pada akhir masa operasional proyek, komunitas akan menilai bagaimana pengembang memulihkan lokasi dan apakah mereka memenuhi janji-janjinya.

Namun arena SLO tidak hanya dibentuk oleh komunitas lokal. Pengembang perlu menggunakan kerangka hukum Indonesia sebagai proses hidup yang spesifik lokasi, misalnya dengan menyusun baseline bersama universitas dan dinas lingkungan provinsi, memublikasikan data pemantauan, serta menjalankan mekanisme pengaduan yang kredibel. Mereka juga harus mengikat komitmen pemerintah daerah dalam nota kesepahaman (MoU) dan memperbaruinya di setiap fase proyek. Ketika SLO melemah, hambatan muncul melalui gugatan AMDAL, penyempitan jalur perizinan, serta penurunan reputasi. Pemulihan membutuhkan mediasi terfasilitasi antara regulator, pakar independen, dan perwakilan komunitas untuk menyelaraskan ekspektasi, jadwal, dan penerimaan jangka panjang.

Status Wilayah Adat di Indonesia memiliki empat kategori: baru terdaftar, terdaftar, terverifikasi, dan tersersertifikasi. Keempat kategori ini memiliki tingkat perlindungan hukum yang berbeda—wilayah tersertifikasi dilindungi penuh dari pemanfaatan eksternal, wilayah terverifikasi telah diakui secara formal dan menunggu sertifikasi, sementara wilayah terdaftar atau baru terdaftar mengharuskan setiap rencana kegiatan usaha untuk dikonfirmasi ulang kepada Badan Registrasi Wilayah Adat sebelum dapat dilanjutkan. **Gambar 6.7** menunjukkan persentase lokasi dalam setiap kategori,



LOKASI WILAYAH ADAT INDONESIA YANG DITUMPUK DENGAN POTENSI PANAS BUMI



Baru Terdaftar	7.279.906,09 Ha	23,03%
Terdaftar	15.922.265,08 Ha	50,37%
Terverifikasi	5.957.573,61 Ha	18,85%
Tersertifikasi	2.453.158,99 Ha	7,76%
Total	**31.612.903,77 Ha**	**100,00%**

Gambar 6.7: Lokasi Wilayah Adat di Indonesia pada Peta Potensi Panas Bumi Indonesia, serta luas lahan yang terkait dengan setiap kategori Wilayah Adat. Sumber: Indigenous Territory Registration Agency. (n.d.). *Land registration map and status*. Pemerintah Indonesia; Project InnerSpace. (2025). Subsurface Favorability WOA [Data Layer], Global module. *GeoMap*.

total luas lahannya, dan keterkaitannya secara geografis dengan sumber daya panas bumi.

Salah satu cara paling efektif untuk membangun *izin operasi sosial* (SLO) dalam pengembangan panas bumi adalah dengan memprioritaskan aplikasi pemanfaatan langsung (*direct use*) yang memberikan manfaat awal yang jelas bagi komunitas Suku Adat. Banyak komunitas adat menggantungkan mata pencaharian pada pertanian, pemanfaatan hasil hutan, dan perikanan skala kecil, aktivitas yang sangat sesuai dengan panas bumi bersuhu rendah hingga menengah. Para petani dapat memanfaatkan energi panas bumi untuk mengeringkan komoditas—seperti kopi atau padi—dengan lebih cepat dan stabil, sehingga mutu dan konsistensi produksi meningkat. Keluarga nelayan dapat menggunakannya untuk mengeringkan ikan atau rumput laut di daerah yang minim fasilitas pendingin. Sistem berskala komunitas juga dapat menyediakan penyimpanan dingin atau es untuk hasil panen, sehingga memperluas akses pasar. (Lihat Bab 4, Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung untuk informasi lebih lanjut.). Dengan mengintegrasikan panas bumi ke dalam industri lokal tanpa memerlukan infrastruktur besar, pendekatan ini menawarkan jalan praktis untuk memperkuat ekonomi adat dan meningkatkan kesejahteraan pedesaan secara berkelanjutan dan berbasis komunitas.[24]

Yang tidak kalah penting adalah cara proyek-proyek ini dikembangkan. Sistem pemanfaatan langsung dapat dirancang bersama kepemimpinan Suku Adat untuk menghormati situs sakral dan pola penggunaan lahan tradisional. Tidak seperti pembangkit listrik panas bumi, aplikasi pemanfaatan langsung memerlukan sedikit peralatan berat dan dapat ditempatkan secara fleksibel, sehingga mengurangi risiko perpindahan penduduk atau gangguan terhadap aktivitas adat.[25]

Proyek-proyek panas bumi terdahulu menunjukkan bagaimana pembangunan skala industri dapat merusak kawasan leluhur dan mengancam mata pencaharian. Sebaliknya, pendekatan yang dipimpin oleh komunitas menekankan manfaat bersama dan pengambilan

keputusan lokal. Komunitas dapat menentukan lokasi dan cara pemanfaatan panas, serta terlibat dalam layanan maupun pendapatan yang dihasilkan. Kolaborasi sejak awal ini membangun kepercayaan, memperkuat kapasitas lokal, dan membuat teknologi panas bumi lebih dikenal dan lebih diterima. Dengan menghormati tata kelola Suku Adat dan memilih pemanfaatan langsung yang sesuai kebutuhan lokal, proyek dapat menjadi sumber kebanggaan dan pemberdayaan, bukan konflik.

PARA AKTOR NEGARA DALAM PENGEMBANGAN PANAS BUMI INDONESIA

Pemangku Kepentingan Regulasi

Perizinan dan penyelenggaraan panas bumi di Indonesia melibatkan sejumlah aktor negara yang mandatnya sering saling bersinggungan. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) memimpin, tetapi kemajuan di lapangan sangat bergantung pada keselarasan keputusan dengan persetujuan lingkungan, perizinan investasi, koordinasi ekonomi, dan proses pemerintahan daerah.[26]

1. **Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) — Regulator Utama**
   KESDM merupakan jangkar sektor panas bumi dan menjalankan tugas melalui berbagai unit.[27] Melalui Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi (EBTKE), Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) menetapkan kebijakan, merencanakan serta melelang WKP, dan mengawasi perizinan dari tahap eksplorasi hingga eksploitasi. Melalui Badan Geologi, KESDM menyediakan pemetaan sumber daya, data geosains, dan informasi kebencanaan geologi. Melalui Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, kementerian menangani kode jaringan (*grid codes*), standar interkoneksi, serta berkoordinasi dengan Perusahaan Listrik Negara (PLN) terkait dispatch dan aspek teknis Perjanjian Jual Beli Listrik (Power Purchase Agreement / PPA). Dalam praktiknya, keputusan-keputusan KESDM membentuk kelayakan finansial (*bankability*) dan linimasa sebuah proyek, mulai dari survei awal hingga Tanggal Operasi Komersial (COD).
2. **Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) — Dampak Lingkungan dan Akses Kawasan Hutan**
   KLHK mengawasi tata kelola dampak lingkungan dan akses ke kawasan hutan. Proyek panas bumi harus melalui proses AMDAL serta pemantauan lingkungan. Untuk lokasi yang berada di dalam hutan lindung atau produksi, pengembang membutuhkan Izin Pinjam Pakai Kawasan Hutan (IPPKH). KLHK juga memastikan perlindungan keanekaragaman hayati, daerah aliran sungai, dan kewajiban rehabilitasi selama pengeboran dan operasi. Karena banyak prospek berada di dalam atau dekat kawasan hutan, keputusan KLHK sering menentukan apakah konstruksi dan pengeboran dapat dimulai tepat waktu.
3. **Kementerian Investasi (BKPM) — Gerbang Perizinan dan Fasilitasi Investor**
   Kementerian Investasi mengelola sistem Online Single Submission (OSS) yang menerbitkan Nomor Induk Berusaha (NIB) dan menyelaraskan perizinan berbasis risiko dengan persetujuan kementerian teknis. Bagi pengembang panas bumi dan kontraktor rekayasa, pengadaan, dan konstruksi (EPC), status OSS harus sejalan dengan progres perizinan KESDM dan KLHK untuk menghindari kekosongan izin yang dapat menghambat pengadaan dan pembiayaan. Kementerian Investasi juga mengoordinasikan insentif investasi dan membantu menyelesaikan konflik perizinan antar-kementerian, sehingga menjadi penghubung penting bagi pelaku baru atau proyek yang sedang melakukan ekspansi.
4. **Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian (Kemenko Perekonomian) — Koordinasi Lintas Kementerian**
   Proyek panas bumi kerap melibatkan kompromi antara kebijakan kehutanan, kesiapan jaringan listrik, kebijakan harga, dan rencana pembangunan daerah. Kemenko Perekonomian menyatukan kementerian terkait untuk menyelaraskan keputusan dan, bila diperlukan, menaikkan isu ke dalam daftar proyek prioritas nasional. Koordinasi yang efektif dapat mengubah approval berurutan menjadi proses paralel dengan standar layanan (service-level agreements) yang lebih jelas dan lebih cepat.
5. **Pemerintah Daerah (Provinsi, Kabupaten, dan Kota) — Otoritas Tuan Rumah dan Penentu Akses Harian**
   Pemerintah daerah menerjemahkan keputusan nasional menjadi akses lahan yang dapat dijalankan dan penerimaan masyarakat lokal. Mereka mengelola kesesuaian tata ruang, memimpin komisi AMDAL di tingkat daerah, menerbitkan izin lokasi dan izin bangunan, memfasilitasi pembebasan lahan, serta



mengoordinasikan pembangunan masyarakat agar manfaat proyek panas bumi dirasakan desa di sekitar lokasi. Pemerintah daerah juga menerima dan mengelola Dana Bagi Hasil (DBH) panas bumi. Kapasitas birokrasi, pengalaman teknis, dan tingkat kepercayaan publik di daerah sering kali menentukan apakah kegiatan operasi berjalan lancar atau justru mengalami penundaan berulang.

6. **Pemerintah Daerah (Provinsi, Kabupaten, dan Kota) — otoritas tuan rumah dan pengelola akses operasional sehari-hari**
   Pemerintah daerah menerjemahkan kebijakan nasional ke dalam akses lokasi yang operasional serta membangun penerimaan sosial masyarakat. Mereka memastikan kesesuaian tata ruang, memimpin Komisi Penilai AMDAL di tingkat daerah, menerbitkan izin lokasi dan izin konstruksi, memfasilitasi pengadaan tanah, serta mengoordinasikan pengembangan dan pemberdayaan masyarakat agar manfaat proyek menjangkau masyarakat di sekitar wilayah kerja panas bumi. Pemerintah daerah juga menerima dan mengalokasikan bagi hasil penerimaan panas bumi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan. Kapasitas kelembagaan, pengalaman teknis, dan tingkat kepercayaan publik di tingkat daerah sering kali menentukan apakah kegiatan konstruksi dan operasi dapat berjalan lancar atau mengalami keterlambatan berulang.

Sejumlah lembaga lainnya juga memiliki peran penting dalam kerangka pengembangan panas bumi di Indonesia.

Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/ Bappenas mengarahkan implementasi rencana pembangunan nasional dan sektoral, menyelaraskan ekspansi panas bumi dengan strategi pembangunan ekonomi, tata ruang, dan pertumbuhan rendah karbon dalam kerangka Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN). (lihat Bab 2, Menggerakkan Transisi: Pasar dan Peluang Panas Bumi Indonesia). Kementerian ini juga mengoordinasikan dukungan donor dan mekanisme pembiayaan iklim yang sering menjadi fondasi kesiapan investasi panas bumi.

Kementerian Dalam Negeri dan Pemerintah Daerah memastikan bahwa kegiatan panas bumi selaras dengan struktur pemerintahan provinsi dan kabupaten/ kota, menyediakan pengawasan regulasi terhadap perencanaan wilayah, administrasi pertanahan, dan proses keterbukaan informasi publik yang memengaruhi perizinan lokal dan pelibatan masyarakat. Koordinasi Kemendagri dengan pemerintah daerah sangat penting terutama untuk penetapan kawasan, penataan ruang, dan perizinan di tingkat subnasional.

Kementerian Keuangan merumuskan dan mengimplementasikan kebijakan fiskal yang secara langsung memengaruhi kelayakan proyek panas bumi—meliputi penganggaran negara untuk infrastruktur, insentif perpajakan, perlakuan kepabeanan untuk peralatan impor, serta pengelolaan risiko dalam skema kemitraan pemerintah dan swasta. Instrumen-instrumen Kemenkeu, termasuk penjaminan dan skema blended finance, sangat penting untuk mengurangi risiko eksplorasi tahap awal dan menarik investasi swasta ke sektor panas bumi.

Secara keseluruhan, mandat berbagai lembaga ini menciptakan rangkaian keputusan, bukan satu izin tunggal. Sebuah WKP harus direncanakan dan dilelang, perizinan harus diselaraskan di OSS, persetujuan lingkungan dan—dalam banyak kasus—persetujuan kehutanan harus diperoleh, akses jaringan harus dipastikan, dan izin serta manfaat bagi masyarakat lokal harus disepakati (lihat **Gambar 6.8**). Urutan dan waktu penyelesaian setiap langkah—serta cara perpindahan tanggung jawab antar-lembaga dikelola—sangat menentukan apakah sebuah proyek dapat maju dengan lancar atau terhambat.

Sebagaimana dicatat dalam Bab 7, Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia, beberapa solusi terarah meliputi: dasbor OSS yang mencerminkan status sektoral secara waktu nyata, serta dukungan terstruktur kepada pemerintah daerah untuk peninjauan AMDAL, penataan lahan, dan program pengembangan serta pemberdayaan masyarakat.

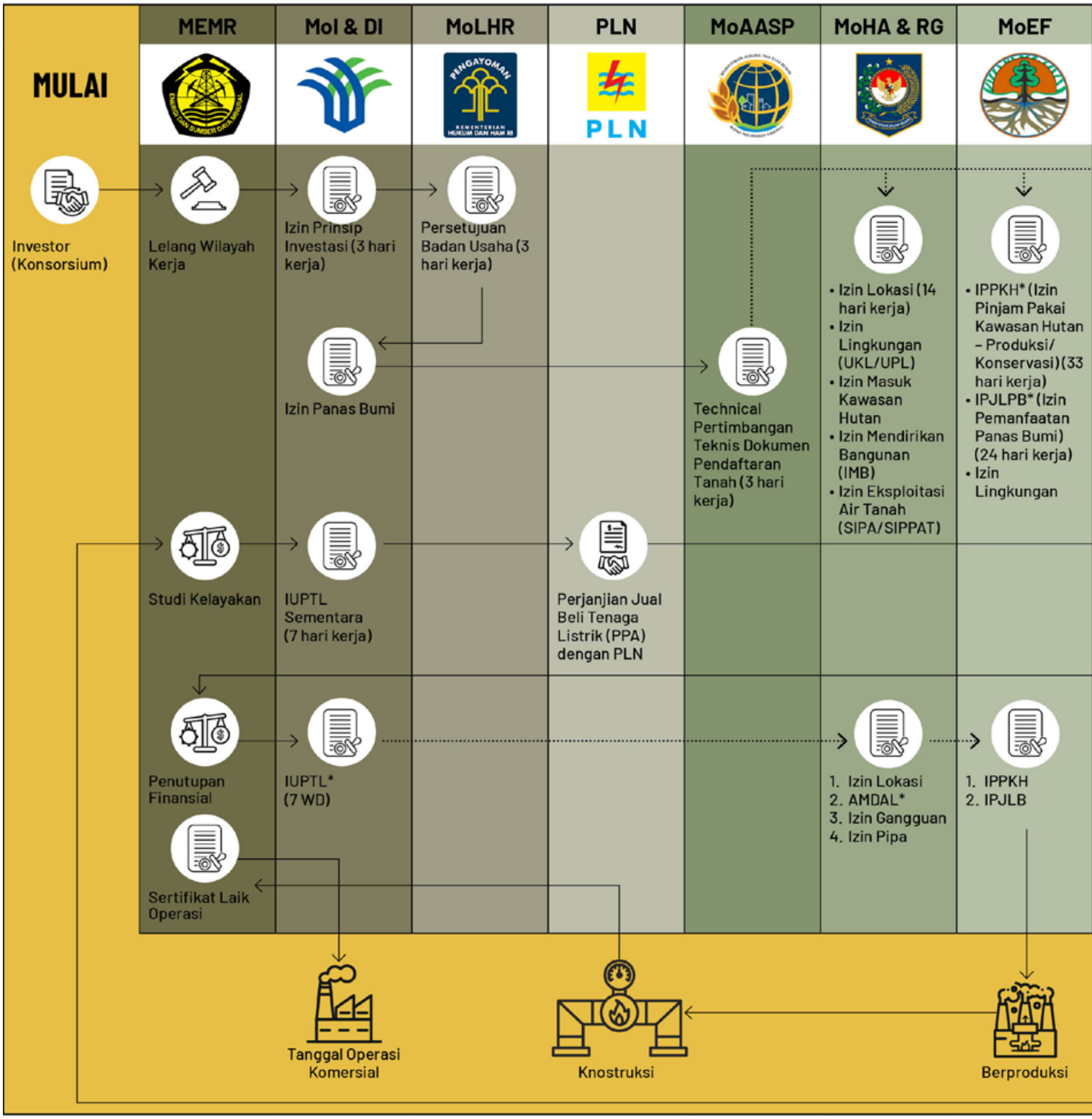
PARA PAKAR LOKAL: PEMANGKU KEPENTINGAN INOVASI DI INDONESIA

Indonesia memiliki banyak pakar yang memahami lanskap unik pengembangan panas bumi, sebagaimana dijelaskan dalam bagian ini.



KERANGKA KELEMBAGAAN UNTUK TATA KELOLA PANAS BUMI DI INDONESIA

Bersambung ke halaman berikutnya





Proses Bisnis

Lelang Terbuka untuk Wilayah Kerja Panas Bumi

Catatan:

→ Proses berurutan (finish-to-start)

⇢ Proses paralel

Singkatan Kementerian:

ESDM	Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
BKPM	Kementerian Investasi
Kemenkumham	Kementerian Hukum dan HAM
PLN	Perusahaan Listrik Negara
ATR/BPN	Kementerian ATR/BPN
Kemendagri	Kementerian Dalam Negeri dan Pemerintahan Daerah
KLHK	Kementerian Lingkungan Hidup & Kehutanan
Kemenhub	Kementerian Perdagangan
Kemenkeu	Kementerian Keuangan
Kemenko Ekon	Kemenko Perekonomian
Polri	Kepolisian RI
Kemenaker	Kementerian Ketenagakerjaan

(Catatan: Kementerian yang ditulis merah telah diubah/dipecah sejak Oktober 2024)

Singkatan Izin:

IPPKH	Izin Pinjam Pakai Kawasan Hutan
IPJLPB	Izin Pemanfaatan Jasa Lingkungan Panas Bumi
P1	Izin Pengangkutan Bahan Peledak
P2	Izin Pembelian & Penggunaan Bahan Peledak
P3	Izin Penyimpanan Bahan Peledak
IUPTL	Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik
AMDAL	Analisis Mengenai Dampak Lingkungan

Gambar 6.8: Interaksi antara kementerian dan lembaga di Indonesia yang terkait dengan energi panas bumi. Sumber: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2018). *Doing business in geothermal*. Pemerintah Indonesia; diproses oleh Purnomo Yusgiantoro Center.

Lembaga Riset Negara—Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

BRIN menetapkan agenda nasional penelitian dan pengembangan (litbang) di Indonesia serta mengelola laboratorium, pilot plant, dan konsorsium yang menerjemahkan ide menjadi solusi siap-terapkan di lapangan.[28] Prioritas riset meliputi geosains eksplorasi, pengeboran, pemodelan reservoir, sistem permukaan, dan aplikasi pemanfaatan langsung. BRIN juga menangani kekayaan intelektual nasional (bersama Direktorat Jenderal terkait), standardisasi bersama mitra industri, dan alih teknologi—menjembatani kesenjangan kesiapan teknologi sehingga pengembang dapat mengurangi risiko pengeboran sumur awal serta menurunkan biaya pokok energi panas bumi.[29] Meskipun menjadi lembaga riset dan inovasi utama, BRIN menghadapi keterbatasan pendanaan. Seiring BRIN dan universitas memperkuat prioritas riset nasional, memasukkan riset pemanfaatan langsung panas bumi—seperti desain jaringan panas, pendinginan absorpsi, dan model simbiosis industri—akan membantu mempersiapkan Indonesia memimpin pengembangan panas bumi generasi berikutnya. Upaya ini dapat menghubungkan riset panas bumi dengan kebijakan industri, pelatihan tenaga kerja, dan pusat inovasi daerah.

Perusahaan Energi dan Utilitas

Pertamina Geothermal Energy (PGE)

PGE adalah anak perusahaan PT Pertamina (Persero), BUMN energi non-kelistrikan utama Indonesia. Pertamina menjadi jangkar operasi domestik, menetapkan norma teknis de facto bagi kontraktor, pemberi pinjaman, dan perusahaan asuransi—mulai dari desain sumur, pengendalian lost circulation, penanganan brine, tekanan pemisahan, hingga strategi sumur make-up. Karena PGE mengoperasikan portofolio yang besar dan beragam, perusahaan ini dapat menguji pembaruan teknologi di satu lapangan lalu melakukan replikasi skala besar, sehingga mempercepat kurva pembelajaran dan meningkatkan faktor ketersediaan. Pertamina umumnya bekerja sama secara pragmatis dengan perusahaan EPCM, OEM global, dan penasihat teknis, sambil memastikan kepatuhan terhadap kewajiban Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) serta aturan pengadaan, sehingga keahlian global dapat dikombinasikan dengan pertumbuhan rantai pasok lokal.

Perusahaan Listrik Negara (PLN)

PLN adalah perusahaan listrik milik negara yang bertugas menjalankan pembangkitan, transmisi, dan distribusi listrik di seluruh Nusantara. Perusahaan ini pada praktiknya memegang monopoli distribusi listrik di Indonesia, sekaligus berkoordinasi dengan para produsen listrik independen untuk memenuhi kebutuhan listrik nasional. PLN beroperasi sepenuhnya di bawah kepemilikan pemerintah melalui Kementerian Badan Usaha Milik Negara dan memegang peran sentral dalam pelaksanaan perencanaan ketenagalistrikan nasional.

Terdapat tiga tahapan penting di PLN yang memengaruhi arah sebuah proyek:

1. Pertama, sebuah proyek pembangkit listrik panas bumi harus tercantum dalam Electricity Supply Business Plan (ESBP) PLN, yaitu peta jalan 10 tahun untuk pengembangan aset pembangkitan, transmisi, dan distribusi.[30] (ESBP diwajibkan oleh undang-undang; dokumen ini juga dikenal sebagai RUPTL.) Dalam praktiknya, PLN adalah satu-satunya entitas yang menerbitkan RUPTL secara komprehensif, dan dokumen ini mencakup sebagian besar jaringan listrik nasional. (Terdapat beberapa operator berizin lain di wilayah usaha tertentu seperti kawasan industri, tetapi cakupannya sangat terbatas[31]) Jika sebuah proyek panas bumi tidak tercantum dalam RUPTL PLN, hal itu berarti kapasitas tersebut tidak dibutuhkan atau tidak diprioritaskan dalam waktu dekat di wilayah terkait. Tidak masuk dalam RUPTL secara efektif menghentikan kemajuan proyek. Sebaliknya, ketika sebuah proyek tercantum dalam RUPTL, hal tersebut menandakan bahwa PLN memperkirakan kebutuhan kapasitas tersebut dan memberikan lampu hijau bagi pengembang untuk melanjutkan.[32]
2. Tahap kedua adalah membuktikan bahwa jaringan listrik dapat menerima dan menyalurkan daya dari proyek tersebut. Sebagai pemilik dan operator tunggal jaringan transmisi dan distribusi Indonesia, PLN melakukan studi interkoneksi; merancang peningkatan atau sambungan yang diperlukan; dan menetapkan persyaratan teknis, jadwal peningkatan jaringan, serta pembagian biaya interkoneksi. Proses ini sangat terkait dengan perencanaan sistem dalam RUPTL, yang memasangkan penambahan



pembangkit dengan penguatan jaringan transmisi yang direncanakan. Pengembang dapat mengusulkan rencana interkoneksi, tetapi PLN meninjau, menyetujui, dan sering kali menentukan peningkatan yang diperlukan melalui studi kelayakan yang mencakup studi interkoneksi jaringan.[33] Tahap ini sangat penting karena potensi panas bumi yang sangat baik tetap dapat terhenti jika node jaringan terdekat lemah atau terlalu jauh, sehingga memerlukan peningkatan besar yang dapat menunda jadwal proyek atau merusak keekonomian proyek.[34] Secara praktis, tahap kedua ini menentukan kapan dan bagaimana pembangkit dapat terhubung: PLN menetapkan spesifikasi teknis, menjelaskan siapa yang menanggung biaya untuk masing-masing elemen interkoneksi, dan mengoordinasikan Tanggal Operasi Komersial (COD), yaitu saat ketika ketentuan komersial proyek mulai berlaku dan kelayakan pembiayaan terbukti dengan kesiapan jaringan transmisi.

3. Tahap terakhir yang sangat menentukan bersama PLN adalah negosiasi PPA dan pelaksanaan proyek hingga mencapai COD. Dalam PPA, struktur tarif dan persyaratan kinerja utama ditetapkan, dan tarif tersebut biasanya berlaku sejak COD hingga akhir masa kontrak—umumnya antara 25 hingga 30 tahun, dengan proyek panas bumi sering berada pada rentang atas.[35] PPA menetapkan target ketersediaan pembangkit, kewajiban dispatch, aturan curtailment, mekanisme koreksi dan penalti, serta tenggat COD dengan liquidated damages bagi keterlambatan.[36] Regulasi terbaru berupaya menstandarkan ketentuan-ketentuan ini, tetapi sebagai pembeli tunggal, PLN tetap memiliki daya tawar yang signifikan, menjadikan PPA yang seimbang dan layak pembiayaan suatu prasyarat penting untuk mencapai penutupan pendanaan.

Peran PLN juga mencakup pengujian pra-COD serta pemenuhan ketentuan operasional yang berkelanjutan. Singkatnya, tahap ketiga ini—finalisasi PPA dan pencapaian COD—mengunci rezim ekonomi dan operasional proyek: tarif dan tenor ditetapkan sejak COD, sementara PPA dan grid code menentukan keandalan, ketersediaan, dan kewajiban dispatch yang pada akhirnya menentukan apakah proyek tersebut dapat dibiayai dan dioperasikan pada skala penuh.

Produsen Listrik Swasta

Pengembang swasta (misalnya Medco, Star Energy, Barito Renewables) membawa disiplin modal, kecepatan penyelesaian, dan keahlian khusus dalam pengeboran, pemantauan reservoir, binary/Organic Rankine Cycle retrofits, dan optimalisasi digital. Perusahaan-perusahaan ini bergabung dalam suatu proyek melalui tender WKP dari Kementerian ESDM, akuisisi saham pada proyek yang sudah berjalan, atau kemitraan dengan pemilik aset negara. Tim yang berhasil umumnya memadukan pengalaman yang mendalam dengan kekuatan neraca keuangan serta mitra lokal yang mampu menavigasi proses perizinan, pengadaan lahan, dan keterlibatan masyarakat.

Namun, beberapa titik masalah yang sama terus muncul dalam pengembangan panas bumi di Indonesia:

- Risiko eksplorasi yang tinggi di awal: sumur yang mahal namun pada akhirnya tidak memiliki sumber daya yang dibutuhkan
- Proses perizinan yang berjalan secara berurutan (misalnya AMDAL, akses kawasan hutan, persetujuan daerah) yang memperpanjang jadwal
- Kesenjangan antara tarif dan biaya serta negosiasi Power Purchase Agreement yang berkepanjangan yang mempersulit pembiayaan, menciptakan kendala jaringan, atau menyebabkan curtailment tanpa ketentuan jelas terkait make-up energy
- Eksposur terhadap fluktuasi nilai tukar dan suku bunga selama periode konstruksi yang panjang
- Pemenuhan persyaratan Tingkat Komponen Dalam Negeri untuk peralatan kritis

PPA yang lebih jelas dan menghargai fleksibilitas, proses perizinan yang berlangsung secara paralel, serta berbagi data yang lebih transparan akan memungkinkan produsen listrik swasta untuk menyederhanakan pekerjaan mereka dan fokus pada area seperti eksplorasi greenfield dan slim-hole pilots, optimalisasi brownfield, dan binary retrofits. Kompetisi diharapkan menurunkan biaya listrik tingkat lanjut (levelized cost of energy), memperluas basis vendor domestik, dan menghadirkan penambahan kapasitas berskala menengah yang lebih konsisten untuk meningkatkan peran panas bumi sebagai sumber listrik baseload dan balancing power.



Bersama-sama, skala dan standar Pertamina, perencanaan dan aturan komersial PLN, serta spesialisasi dan agility produsen listrik swasta menciptakan feedback loop yang mengatur biaya, jadwal, dan keandalan. Ketika ketiga aktor ini selaras, risiko eksplorasi menurun, pembiayaan dapat dicapai lebih cepat, dan proses commissioning menjadi lebih dapat diprediksi.

Universitas Negeri Berbasis Riset dan Program yang Dapat Mereka Dukung

Sama pentingnya adalah keberadaan tenaga kerja terampil yang menjalankan fasilitas pembangkit dan menjaga jadwal proyek tetap tepat waktu. Sebagaimana dijelaskan dalam Bab 5, Dari Sumur ke Sumur: Mengoordinasikan Kelembagaan Indonesia dan Tenaga Kerja Migas untuk Transisi Panas Bumi, politeknik dan lembaga pendidikan vokasi—seperti Politeknik Energi dan Mineral "Akamigas" di Cepu milik KESDM, serta berbagai institusi utama di bawah Kementerian Pendidikan Tinggi, Ilmu Pengetahuan, dan Teknologi, bersama program pelatihan vokasi tingkat menengah di bidang kelistrikan, perpipaan, pengelasan, dan instrumentasi—perlu digerakkan melalui program pembelajaran berbasis mata kuliah, rotasi lapangan, dan skema sertifikasi berbasis kompetensi yang selaras dengan standar pekerjaan di sektor panas bumi. Pusat pelatihan KESDM dan Balai Latihan Kerja milik Kementerian Ketenagakerjaan dapat memberikan micro-credentials bagi kru pengeboran, mekanik rig, teknisi listrik, juru las, petugas keselamatan dan kesehatan kerja serta lingkungan (K3L), dan teknisi instrumentasi, sehingga tenaga kerja lokal benar-benar siap mendukung tahapan eksplorasi, konstruksi, serta operasi dan pemeliharaan.

Dan agar ekosistem ini dapat berjalan secara efektif, pemangku kepentingan regulasi, lembaga penelitian negara, perusahaan energi dan utilitas, pengembang listrik swasta, serta perguruan tinggi harus beroperasi sebagai satu kesatuan bertahap: menyediakan lokasi "living lab" bersama di dekat WKP, merancang kurikulum bersama yang dikembangkan bersama pengembang dan produsen peralatan asli, menyediakan mekanisme transfer kredit antara jalur diploma dan sarjana, serta membangun inkubator yang mendukung pelaku usaha dalam pengembangan aplikasi pemanfaatan langsung, seperti panas proses untuk agroindustri, penyimpanan dingin, dan sistem pemanasan kawasan untuk pariwisata. Dengan pendekatan yang terintegrasi ini, Indonesia dapat menghasilkan para insinyur, analis, dan tenaga teknis terampil yang dibutuhkan untuk mengembangkan panas bumi dari tahap eksplorasi hingga operasi yang andal pada sistem jaringan listrik.

Programs	Perguruan Tinggi Negeri
Ilmu bawah permukaan, teknik pengeboran, fluida dan kimia, sistem lingkungan	Institut Teknologi Bandung, Universitas Gadjah Mada, Universitas Indonesia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Institut Pertanian Bogor
Kurikulum berbasis industri untuk menjembatani pembelajaran di kelas dengan praktik lapangan	Universitas Pertamina
Rekayasa sumur, manajemen pengeboran, operasi produksi, keuangan, penelitian sosial, kebijakan	Universitas Pembangunan Nasional "Veteran", Universitas Trisakti, Universitas Indonesia (fakultas ekonomi dan kebijakan publik), Universitas Prasetiya Mulya, Universitas Bina Nusantara, Universitas Padjadjaran, dan Universitas Gadjah Mada

Sumber: Faculty of Mining and Petroleum Engineering. (n.d.). *Master's program in geothermal engineering*. Institut Teknologi Bandung; Department of Geological Engineering. (n.d.). *Geothermal Research Center (GRC)*. Gadjah Mada University.

KESIMPULAN

Konsultasi masyarakat di berbagai wilayah Indonesia menyampaikan satu pesan yang jelas: bangunlah panas bumi bersama masyarakat, bukan untuk mereka. Pelibatan harus bersifat berkelanjutan dan dua arah agar komunitas suku adat, pemerintah desa, kelompok perempuan dan pemuda, serta UMKM lokal merasa dihargai dan terlibat. Ketidakharmonisan dalam hubungan ini dapat menghentikan proyek dan menghambat pembangunan selama bertahun-tahun. Dengan semangat tersebut, kami mengusulkan rekomendasi berikut untuk mendorong kolaborasi yang positif dan berkelanjutan serta mempercepat implementasi panas bumi di Indonesia:



PERTIMBANGAN UNTUK MENDORONG KOLABORASI YANG BERKELANJUTAN

1. **Perkuat tata kelola bersama dengan masyarakat sekitar.** Laksanakan partisipasi bermakna serta *Persetujuan Bebas, Sebelumnya, dan Berinformasi* (FPIC) untuk wilayah adat; sediakan asistensi teknis awal, penerjemahan, fasilitasi, dan dukungan penulisan proposal agar masyarakat dapat berpartisipasi sebagai mitra sejajar.

2. **Bentuk Dana Panas Bumi Provinsi/Komunitas.** Tentukan bagian PNBP Panas Bumi dan kewajiban perusahaan untuk menjadi pendanaan multiyears yang dapat diprediksi bagi wilayah penghasil—dialokasikan melalui perencanaan partisipatif desa dengan anggaran publik dan kontrak berbasis kinerja.

3. **Prioritaskan pengembangan masyarakat.** Sediakan hibah bagi kelompok pemuda, koperasi, dan usaha perempuan untuk mengikuti peningkatan keterampilan, peningkatan kapasitas UMKM, serta layanan lokal yang selaras dengan kebutuhan proyek dan rencana pembangunan daerah.

4. **Sederhanakan perizinan ke dalam satu jalur kritis.** Tunjuk lembaga koordinator, wajibkan pre-application scoping (status lahan/hutan, air, jaringan, harga), terapkan persetujuan paralel dengan batas waktu layanan, dan sediakan pelacak OSS bersama dengan eskalasi otomatis saat tenggat meleset.

5. **Integrasikan keputusan lahan, lingkungan, dan jaringan sejak awal** Gunakan single map, standarkan klausul pembagian manfaat, dan amankan studi interkoneksi awal bersama PLN untuk meminimalkan desain ulang, mengurangi risiko jadwal, dan meningkatkan *bankability*.

6. **Jadikan TKDN benar-benar membangun kapasitas.** Padukan kewajiban TKDN dengan pengembangan vendor, pelatihan tersertifikasi, dan konsorsium BRIN–universitas–industri; alokasikan sebagian PNBP untuk litbang, layanan pengujian, dan pipeline SDM.

7. **Publikasikan hal-hal penting dan tuntaskan cepat.** Bangun dashboard Monitoring–Evaluation–Learning yang transparan, audit sosial independen, dan mekanisme pengaduan yang kredibel dengan penyelesaian berbatas waktu—agar hasil dapat terlihat, dibandingkan, dan diperbaiki.

8. **Selaraskan pembiayaan dengan risiko dan kecepatan.** Terapkan langkah-langkah untuk menurunkan risiko finansial terkait pemenuhan SLO dan TKDN, serta beri insentif fiskal bagi kinerja perizinan yang tepat waktu.

9. **Prioritaskan anchor offtaker dan klaster penggunaan langsung.** Arahkan panas bumi ke kawasan industri, pusat data, zona pariwisata, fasilitas pendinginan dan air, serta lokasi pertahanan seperti pos perbatasan untuk mengubah panas menjadi lapangan kerja lokal dan permintaan berkelanjutan.

10. **Uji, pelajari, dan replikasi.** Laksanakan proyek percontohan, lakukan evaluasi secara transparan, lalu skalakan model tersebut ke berbagai provinsi dengan peran yang jelas bagi KESDM, KLHK, Kementerian Investasi/Perindustrian Hilir, PLN, dan pemerintah daerah.

11. **Bangun talent pipeline:** Sebagaimana dibahas dalam Bab 5 Dari Sumur ke Sumur: Mengoordinasikan Kelembagaan Indonesia dan Tenaga Kerja Migas untuk Transisi Panas Bumi, KESDM dan Kementerian Pendidikan Tinggi/Riset/Teknologi perlu membentuk Koalisi Talenta Panas Bumi Nasional yang mengintegrasikan universitas riset, politeknik, dan Balai Latihan Kerja Kementerian Ketenagakerjaan dalam satu jalur—WKP living labs, kurikulum bersama OEM–pengembang, co-op, mikro-kredensial, dan transfer kredit—untuk memenuhi kebutuhan tenaga kerja dari eksplorasi hingga operasi andal jaringan.

12. **Perluas panas bumi melampaui listrik:** Perluas definisi pemanfaatan panas bumi tidak hanya untuk pembangkitan listrik, tetapi juga penggunaan langsung (*direct use*) dan pendinginan berbasis panas bumi (*geothermal cooling*). Tetapkan program percontohan dan kerangka kebijakan yang jelas untuk mendukung aplikasi ini dalam strategi dekarbonisasi industri dan energi komunitas.

Dengan menjalankan langkah-langkah ini, proyek panas bumi dapat menjadi bukti kemajuan nyata bagi masyarakat, mempercepat waktu pembangunan, dan memperkuat kapasitas nasional. Panas bumi tidak hanya menjadi sumber panas dan listrik yang andal, tetapi juga sumber peluang yang adil di mana pun potensi energi tersebut berada.



REFERENSI

1 Audit Board of Indonesia. (2014). *Law number 21 of 2014 concerning geothermal energy*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/38684/uu-no-21-tahun-2014

2 Audit Board of Indonesia. (2016). *Government regulation (PP) number 28 of 2016 concerning the amount and procedures for granting geothermal production bonuses*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/5749

3 Audit Board of Indonesia. (2017). *Government regulation (PP) number 7 of 2017 concerning geothermal energy for indirect utilization*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/5827/pp-no-7-tahun-2017

4 Audit Board of Indonesia. (2018). *Regulation of the Minister of Energy and Mineral Resources number 37 of 2018 concerning offering of geothermal working areas, granting of geothermal permits, and assignment of geothermal businesses*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/142928/permen-esdm-no-37-tahun-2018

5 Audit Board of Indonesia. (2021). *Regulation of the Minister of Energy and Mineral Resources number 33 of 2021 concerning occupational safety and health, environmental protection and management, and geothermal technical guidelines for indirect utilization*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/257461/permen-esdm-no-33-tahun-2021

6 Audit Board of Indonesia, 2018.

7 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2025). Performance report of the Directorate General of New, Renewable Energy, and Energy Conservation (DG NREEC) for 2024. Government of Indonesia.

8 Audit Board of Indonesia, 2014.

9 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2022). *Presidential Decree No. 26 of 2022—Annex B-I and B-II*. Government of Indonesia. https://jdih.esdm.go.id/common/dokumen-external/Salinan%20PP%20Nomor%2026%20Tahun%202022.pdf

10 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2025). *2024 Directorate General of Renewable Energy and Energy performance report*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-ditjen-ebtke-tahun-2024.pdf



11 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2019). *2014–2019 performance report of the Ministry of Energy and Mineral Resources of the Republic of Indonesia*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-esdm-2014-2019.pdf

12 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2021). *2020 performance report of the Ministry of Energy and Mineral Resources*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-lapoan-kinerja-kesdm-2020.pdf

13 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2022). *2021 performance report of the Ministry of Energy and Mineral Resources*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-kementerian-esdm-2021.pdf

14 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2023). *2022 performance report of the Ministry of Energy and Mineral Resources*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-kementerian-esdm-tahun-2022.pdf

15 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2024). *2023 performance report of the Ministry of Energy and Mineral Resources*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-kementerian-esdm-tahun-2023.pdf

16 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2025). *2024 performance report of the Ministry of Energy and Mineral Resources*. Government of Indonesia. https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-kementerian-esdm-tahun-2024.pdf

17 Directorate General of Fiscal Balance. (2023). *Cash transfer details fiscal tear 2024*. Government of Indonesia. https://djpk.kemenkeu.go.id/wp-content/uploads/2023/09/Rincian-Alokasi-DAU-DBH-TA-2024.pdf

18 R., Djandam, A., & Gurning, L. (2023). Challenges in getting public acceptance on geothermal project in Indonesia. In *Proceedings, 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://www.researchgate.net/publication/369201771_Challenges_in_Getting_Public_Acceptance_on_Geothermal_Project_in_Indonesia

19 CELIOS & WALHI. (2024). *Geothermal in Indonesia: The dilemma of potential and exploitation in the name of energy transition*. WALHI. https://www.walhi.or.id/uploads/buku/ID%20CELIOS%20x%20WALHI%20Geothermal%202024.pdf

20 Fadhillah et al., 2023.

21 Situmorang, R. M. (2021, July 7). *Bedugul geothermal power plant stalled? Here's a new, renewable energy solution for the Balinese community*. Kumparan. https://kumparan.com/roni-marudut-s/pltp-bedugul-mangkrak-ini-solusi-energi-baru-terbarukan-untuk-masyarakat-bali-1w5SFBLMJms

22 Purwanto, E. H., Nazif, H., Yulianugroho, S., Primasatya, S., & Fathoni, A. (2021). Community engagement support on sustainable geothermal operation: A perspective on corporate social responsibility implementation in Indonesia. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland. https://www.worldgeothermal.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/02039.pdf

23 Information Portal of Indonesia. (2017, December 3). *Tribes*. https://indonesia.go.id/profil/suku-bangsa/kebudayaan/suku-bangsa#:~:text=Indonesia%20memiliki%20lebih%20dari%20300,mencapai%2041%25%20dari%20total%20populasi

24 Bagaskara, A., Al Asy'ari, M. R., Adityatama, D. W., Purba, D., Haykal-Ahmad, A., Rizky Pratama, A., Banjarnahor, N. E., & Mukti, A. W. (2023). Exploring new ideas to promote and improve geothermal direct use in Indonesia. In *Proceedings of the 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2023/Bagaskara2.pdf

25 Adityatama, D., Umam. M., Purba, D., & Muhammad, F. (2019). Review on geothermal direct use application as an alternative approach in community engagement at early exploration phase in Indonesia. In *Proceedings of the 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2019/Adityatama.pdf

26 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2018). *Doing business in geothermal*. Government of Indonesia. https://www.scribd.com/document/382808233/Proses-Bisnis-Geothermal-ESDM#:~:text=Oleh%3A%20Direktorat%20Panas%20Bumi

27 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2023). *Presidential Regulation No. 11/2023 on the Ministry of Energy and Mineral Resources (ESDM).* Government of Indonesia. https://jdih.esdm.go.id/dokumen/download?id=2023perpres11.pdf

28 Audit Board of Indonesia. (2021). *Presidential regulation (Perpres) number 78 of 2021 concerning the National Research and Innovation Agency*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/178084/perpres-no-78-tahun-2021

29 BRIN. (2025, January 23). *BRIN strengthens energy and manufacturing research to support the National Medium-Term Development Plan (RPJMN).* https://brin.go.id/news/122151/brin-perkuat-riset-energi-dan-manufaktur-untuk-dukung-rpjmn

30 Global Legal Group. (2025). *Renewable energy laws and regulations: Indonesia 2026*. International Comparative Legal Guides. https://iclg.com/practice-areas/renewable-energy-laws-and-regulations/indonesia

31 Global Legal Group, 2025.

32 Global Legal Group, 2025.

33 Assegaf Hamzah & Partners. (2020, August 27). *In review: Renewable energy policy and regulation in Indonesia*. Lexology. https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=4782252c-35d2-4092-9253-a7576937848e

34 Global Legal Group, 2025.

35 Hogan Lovells Lee & Lee. (2015). *Geothermal power projects in Indonesia*. https://www.hoganlovells.com/-/media/hogan-lovells/pdf/publication/client-note-geothermal-power-projects-in-indonesia_pdf.pdf

36 Draps, F., Neves Mandelli, J.-L., Ng, A., & Natalia, I. V. (2025, March 14). *Indonesia's new regulation on renewable PPAs–Supporting renewable power in a time of global uncertainty*. Ashurst. https://www.ashurst.com/en/insights/indonesias-new-regulation-on-renewable-ppas-supporting-renewable-power/





Bab 7

Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia

Reananda Hidayat Permono dan Fabby Tumiwa
Institute for Essential Services Reform

Sebagai pemilik dari salah satu sumber daya panas bumi terbesar di planet ini, Indonesia adalah pemimpin dunia dalam penerapan panas bumi konvensional—dan Indonesia juga memiliki ribuan gigawatt potensi panas bumi generasi baru yang belum dimanfaatkan yang dapat digunakan untuk listrik, panas untuk penggunaan langsung, dan pendinginan.

Hingga saat ini, Indonesia sebagai negara Cincin Api telah menghasilkan hampir 3 gigawatt listrik panas bumi—kurang dari 10% dari cadangan hidrotermal terbukti yang dimilikinya. Indonesia telah menyatakan komitmennya untuk meningkatkan produksi panas bumi sebesar 5 gigawatt pada tahun 2034 untuk mencapai lebih dari 8 gigawatt produksi listrik.[1] Namun, dengan menggunakan peta jalan kebijakan yang diuraikan dalam bab ini, Indonesia dapat menghasilkan 15 gigawatt listrik panas bumi yang stabil dan 15 gigawatt panas bumi termal pada tahun 2035. 15 gigawatt listrik ini merupakan kombinasi dari target pemerintah tahun 2034 dan tambahan 6 gigawatt listrik dari teknologi dan sumber daya generasi baru. Angka ini bahkan dapat meningkat hingga mencapai 25 gigawatt listrik dan 35 gigawatt panas bumi pada tahun 2045.

Seperti yang ditunjukkan oleh data dalam lampiran Bab 3, "Memperluas Cakupan: Peluang Panas Bumi Generasi baru," Potensi panas bumi teknis Indonesia mencapai 2.160 gigawatt di luar kawasan lindung. Dengan demikian, meskipun komitmen Indonesia terdengar ambisius, hal ini memungkinkan untuk dicapai.

Faktanya, mencapai sebagian kecil saja dari potensi panas bumi Indonesia akan memperkuat ketahanan jaringan listrik Indonesia, menurunkan permintaan puncak, mengurangi impor bahan bakar, mempertajam daya saing industri, memperluas pendinginan yang terjangkau—dan memperkuat peran Indonesia sebagai pemimpin global dalam energi bersih dan stabil. Bab ini menguraikan peta jalan mengenai bagaimana



REKOMENDASI KEBIJAKAN PANAS BUMI UNTUK INDONESIA

LEPASKAN POTENSI PANAS BUMI GENERASI BARU INDONESIA

- Perbarui undang-undang panas bumi untuk secara jelas membahas energi panas bumi generasi baru dan penggunaan langsung.
- Tetapkan target nasional untuk listrik panas bumi dan panas industri serta jalur untuk mencapainya.
- Industri pembangkit listrik dan pusat data menggunakan panas dan pendinginan geotermal.
- Jadikan panas bumi sebagai inti pendinginan untuk pembangunan perkotaan.

MOBILISASI INVESTASI DAN AKSELERASI SKALA

- Buatjalur cepat untuk proses perizinan, koordinasi administratif, dan prosedur lainnya.
- Kurangi risiko keuangan dengan data terbuka dan program eksplorasi yang diperluas.
- Gunakan pengadaan kolektif untuk menurunkan biaya proyek.
- Standarisasi kontrak jangka panjang untuk energi panas bumi.

PERKUAT KEPERCAYAAN DAN MANFAAT MASYARAKAT

- Tingkatkan partisipasi masyarakat dan jamin manfaat bagi masyarakat dengan mereformasi bonus produksi panas bumi.
- Perluas ekosistem panas bumi untuk membuka lapangan kerja lokal.

Indonesia dapat mewujudkan komitmennya dengan meningkatkan skala pembangkit listrik panas bumi generasi baru, pendinginan perkotaan, dan pemanasan industri. Dengan menerapkan 10 rekomendasi kebijakan yang ditawarkan dalam bab ini, Indonesia dapat berada di jalur yang tepat untuk memenuhi target iklimnya sekaligus menurunkan tagihan energi konsumen dan industri, menciptakan lebih dari 650.000 lapangan kerja berkualitas, serta membuka miliaran investasi swasta.

Berlandaskan kekuatan geologis dan kapasitas negara Indonesia—dan berdasarkan praktik terbaik global—paket ini memastikan masyarakat berbagi manfaat, memperkuat keamanan energi, dan memberikan hasil tersebut dengan risiko lingkungan yang jauh lebih rendah daripada bahan bakar fosil atau energi panas bumi konvensional.

10 REKOMENDASI UNTUK MEMPERLUAS PENGEMBANGAN ENERGI PANAS BUMI DI INDONESIA

Lepaskan Potensi Panas Bumi Generasi baru di Indonesia

Indonesia adalah pemimpin global dalam energi panas bumi konvensional, tetapi langkah penting selanjutnya yang harus diambil Indonesia adalah memasukkan energi panas bumi generasi baru—serta pendinginan panas bumi dan panas proses industri—ke dalam kerangka kerjanya.



1. Perbarui undang-undang panas bumi untuk secara jelas membahas energi panas bumi generasi baru dan penggunaan langsung.
2. Tetapkan target nasional untuk listrik panas bumi dan panas industri serta jalur untuk mencapainya.
3. Industri pembangkit listrik dan pusat data menggunakan panas dan pendinginan geotermal.
4. Jadikan panas bumi sebagai inti pendinginan untuk pembangunan perkotaan.

Mobilisasi Investasi dan Akselerasi Skala

Menciptakan kepastian pembiayaan proyek dan melepaskan modal swasta adalah dua kunci untuk mengembangkan peluang panas bumi di Indonesia.

5. Buat jalur cepat untuk proses perizinan, koordinasi administratif, dan prosedur lainnya.
6. Kurangi risiko keuangan dengan data terbuka dan program eksplorasi yang diperluas.
7. Gunakan pengadaan kolektif untuk menurunkan biaya proyek.
8. Standarisasi kontrak jangka panjang untuk energi panas bumi.

Perkuat Kepercayaan dan Manfaat Komunitas

Memperluas manfaat bagi masyarakat dan pekerja sekaligus mengurangi risiko lingkungan.

9. Tingkatkan partisipasi masyarakat dan jamin manfaat bagi masyarakat dengan mereformasi bonus produksi panas bumi.
10. Perluas ekosistem panas bumi untuk membuka lapangan kerja lokal.

Secara keseluruhan, langkah-langkah ini dapat memberikan Indonesia jalur yang menentukan: landasan hukum modern yang merangkul energi panas bumi generasi baru serta pemanasan dan pendinginan panas bumi; kerangka kerja berbagi risiko yang memobilisasi modal swasta dan publik; aturan pasar yang menciptakan permintaan yang dapat diprediksi dan penetapan harga yang adil; dan perlindungan yang menjamin masyarakat berbagi langsung dalam manfaatnya.

KERANGKA HUKUM PANAS BUMI SAAT INI DI INDONESIA

Dahulu, hukum Indonesia mengklasifikasikan eksplorasi panas bumi sebagai operasi pertambangan, yang membuat pengembangan proyek pembangkit listrik tunduk pada aturan dan regulasi yang rumit.[2] Namun, pemberlakuan Undang-Undang Panas Bumi No. 21/2014, yang dirancang berdasarkan sistem hidrotermal konvensional, mengklasifikasikan kembali penggunaan panas bumi sebagai kegiatan non-pertambangan dan membantu menyederhanakan pengembangan panas bumi.[3] Undang-undang tersebut juga membedakan pengembangan panas bumi untuk pembangkit listrik—"penggunaan tidak langsung"—dari panas bumi "penggunaan langsung".

Meskipun bermanfaat, perubahan ini menempatkan perizinan pembangkit listrik panas bumi di tangan pemerintah pusat[4]—dan membiarkan perizinan penggunaan langsung energi panas bumi terbagi secara tidak efisien antara pemerintah pusat dan pemerintah daerah.[5]

Saat ini, pengembang aplikasi panas bumi memerlukan izin yang berbeda tergantung pada jenis instalasinya:

1. Pembangkitan listrik memerlukan Izin Usaha Panas Bumi.[6]
2. Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 5 Tahun 2021, proyek penggunaan langsung justru memerlukan Sertifikat Kelayakan Operasional khusus untuk penggunaan langsung panas bumi.[7]
3. Jika lokasi pembangkit panas bumi berada di kawasan hutan, pengembang juga harus memperoleh Izin Resmi untuk Penggunaan Kawasan Hutan.[8]

Pada tahun 2017, para pembuat undang-undang memperkenalkan peraturan yang lebih rinci mengenai proses perizinan pembangkit listrik melalui Peraturan Pemerintah No. 7/2017[9] dan Peraturan Menteri ESDM No. 37/2018.[10,11]

Perizinan usaha di sektor energi diatur oleh Peraturan Menteri ESDM No. 5/2021,[12] yang menghubungkan kegiatan panas bumi dengan Klasifikasi Baku Lapangan Usaha Indonesia (KBLI) masing-masing dalam sistem Pengajuan Tunggal Online (OSS) nasional. Peraturan ini



juga menguraikan persyaratan kesiapan operasional melalui Sertifikat Kelayakan Operasional untuk fasilitas panas bumi. Namun, ini adalah batasan kerangka peraturan nasional Indonesia saat ini untuk proyek penggunaan langsung panas bumi, karena pemerintah belum mengeluarkan KBLI atau peraturan pelaksana khusus untuk kegiatan penggunaan langsung. Sejak diberlakukannya Undang-Undang Omnibus No. 11/2020 (UU Penciptaan Lapangan Kerja),[13] pemerintah Indonesia telah menyatakan niatnya untuk menyederhanakan peraturan yang mengatur kegiatan penggunaan langsung panas bumi, tetapi belum melakukannya.

KERANGKA KERJA SAAT INI YANG MENGATUR PENGEMBANGAN PEMBANGKIT LISTRIK PANAS BUMI

PLN, perusahaan listrik milik negara Indonesia, memiliki dan mengoperasikan jaringan listrik nasional. Perusahaan ini mengendalikan pembangkitan, transmisi, distribusi, dan penjualan ritel. Partisipasi sektor swasta terutama terjadi melalui produsen listrik independen yang menjual listrik ke PLN berdasarkan Perjanjian Pembelian Listrik (Power Purchase Agreement/PPA). Penjualan langsung ke konsumen industri diperbolehkan dalam kondisi terbatas. Struktur ini diatur oleh Undang-Undang Kelistrikan No. 30/2009 dan Peraturan Menteri ESDM No. 10/2018.

Untuk energi panas bumi, Peraturan Pemerintah No. 7/2017 di bawah Undang-Undang Panas Bumi menetapkan kerangka kerja untuk penggunaan tidak langsung—pembangkitan listrik—dengan menempatkan Kementerian ESDM sebagai penanggung jawab Wilayah Kerja Panas Bumi dan perizinan serta memberikan dasar untuk penjualan listrik ke PLN. Seiring pemerintah merevisi Peraturan Pemerintah No. 7/2017 hingga tahun 2025 untuk memperlancar pembangunan,[14] pemerintah harus memastikan bahwa teknologi baru seperti sistem panas bumi canggih dan sistem panas bumi rekayasa secara eksplisit dimasukkan ke dalam kerangka kerja yang diperbarui (Lihat Rekomendasi 1).

Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi di Kementerian ESDM memimpin implementasi kebijakan, penetapan harga, dan perizinan panas bumi. Kementerian ESDM juga mengkoordinasikan pembiayaan dan dukungan kebijakan dengan kementerian lain seperti Kementerian Keuangan, Kementerian BUMN, Kementerian Perindustrian, Kementerian Investasi dan Industri Hilir, Kementerian Lingkungan Hidup, dan Kementerian Kehutanan. Reformasi terbaru mencakup sistem OSS untuk perizinan dan Peraturan Menteri ESDM No. 11/2024 tentang peralatan buatan dalam negeri. ESDM juga merumuskan harga batas atas untuk

RINGKASAN SKEMA PENGEMBANGAN PANAS BUMI DAN ENTITAS PELAKSANA UTAMA DI INDONESIA

Survei Awal	Penentuan dan Lelang Serle Wilayah Kerja (WKP)	Pemberian Izin Usaha Panas Bumi (IPB)	Eksplorasi dan Studi Kelayakan	Eksploitasi
Pemerintah/KESDM, Melalui Badan Geologi, melakukan survei awal (SP) dan survei eksplorasi awal (SPE) atau dapat menugaskan ke: • Lembaga Riset (PSP) • Badan usaha (PSPE)	**KESDM** Melakukan lelang WKP berdasarkan skema akuisisi data: • Lelang terbuka: SP, SPE, PSP • Lelang terbatas: PSPE Atau dapat menugaskan ke BUMN atau Badan Layanan Umum (BLU)	**KESDM** Memberikan IPB ke pemenang lelang (**Badan Usaha**) untuk kegiatan eksploitasi, dengan, mematuhi peraturan lingkungan yang relevan, total durasi 37 tahun dan kemungkinan perpanjangan 20 tahun.	**Badan Usaha** menyerah-kan hasil Studi Kelayakan (FS) ke **KESDM**, melakukan eksplorasi panas bumi, dan menandatangani Power Purchase Agreement (PPA).	**Badan Usaha** yang mengembangkan Pembrangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTPB) dapat menjual listrik yang diproduksi (ke publik lewat PLN0 dan harus mengembalikan IPB ke **pemerintah** setelah masa berlakunya habis.

Gambar 7.1: Ringkasan fase dan rencana pengembangan panas bumi serta entitas kunci terkait. Sumber: penulis.



energi terbarukan berdasarkan Peraturan Presiden No. 112/2022, peraturan tarif listrik panas bumi saat ini.

PLN menyatakan bahwa peralihan ke rezim harga saat ini telah mempermudah penawaran harga yang lebih menarik kepada pengembang dan memberikan dasar hukum yang lebih kuat untuk negosiasi Perjanjian Pembelian Listrik (PPA). Namun, beberapa pengembang pembangkit listrik panas bumi berpendapat bahwa harga batas saat ini masih jauh dari harapan sektor swasta, khususnya dalam hal tingkat pengembalian internal yang diinginkan.

Sebagaimana disebutkan, Undang-Undang Panas Bumi dan peraturan terkait menetapkan proses perizinan panas bumi untuk pembangkitan listrik. Tahapan-tahapan utama meliputi (i) survei pendahuluan; (ii) lelang pemerintah atas Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) di mana pengembang memperoleh Izin Usaha Panas Bumi (IPB); (iii) eksplorasi dan pengembangan (hingga tujuh tahun) yang meliputi studi, pengeboran, dan penilaian; dan (iv) penandatanganan PPA dengan PLN. (Lihat **Gambar 7.1**.)

Untuk mencapai fase komersial, PLN saat ini menawarkan tiga program utama:

1. Kemitraan WKP dari Produsen Listrik Independen, yang beroperasi di bawah beberapa pengaturan:
   - **Perjanjian Pembelian Listrik:** Pemegang Izin Usaha Panas Bumi (IPB) mengembangkan dan mengoperasikan pembangkit listrik secara mandiri atau bersama dengan anak perusahaan PLN.
   - **Perusahaan Proyek Khusus:** Proyek ini dikembangkan melalui entitas usaha patungan khusus yang dibentuk antara pengembang panas bumi dan PLN (atau anak perusahaannya).
   - **Perjanjian Pembelian Uap:** Pemegang IPB memasok uap ke anak perusahaan PLN yang memiliki dan mengoperasikan pembangkit listrik, seperti di pembangkit listrik Kamojang di Jawa Barat.
2. PWKP yang dimiliki dan dioperasikan oleh PLN (pengelolaan mandiri) di mana PLN mengembangkan dan mengelola pembangkit listrik, termasuk operasi sumur, secara langsung.
3. Perjanjian Eksplorasi Panas Bumi dan Konversi Energi, yang melibatkan mitra swasta ke dalam WKP milik PLN. Perjanjian ini membagi risiko dan keuntungan dengan menugaskan PLN tanggung jawab untuk perizinan, akuisisi lahan, dan persiapan lokasi, sekaligus menawarkan pembayaran biaya pengeboran di awal untuk meningkatkan pengembalian proyek.

Selain itu, pemerintah nasional telah memperkenalkan serangkaian kebijakan untuk mempercepat pengembangan pembangkit listrik panas bumi. Langkah-langkah utama meliputi Skema Pengeboran Pemerintah (Peraturan Menteri Keuangan No. 62/2017),[15] yang diharapkan dapat mengurangi risiko tahap awal dengan membiayai eksplorasi; peralihan dari *Bangun-miliki-kelola-serahkan* (BOOT) ke *Bangun-miliki-kelola* (BOO)(Peraturan Menteri ESDM No. 4/2020), yang diharapkan dapat membuat proyek lebih layak dibiayai dengan memungkinkan pengembang untuk mempertahankan kepemilikan; dan kerangka Nilai Ekonomi Karbon (Peraturan Menteri ESDM No. 16/2022), yang memungkinkan pendapatan melalui kredit karbon. Dukungan lebih lanjut datang dari pelonggaran persyaratan konten lokal (Peraturan Menteri ESDM No. 11/2024) untuk meningkatkan kelayakan proyek. Secara bersama-sama, kebijakan-kebijakan ini ditetapkan dengan tujuan untuk menurunkan biaya, berbagi risiko, dan mempercepat proyek-proyek yang terhenti.

GAMBARAN UMUM DAN RENCANA PENGEMBANGAN PEMANFAATAN LANGSUNG ENERGI PANAS BUMI

Pada tahun 1999, Pertamina Geothermal Energy dan Lembaga Ilmu Pengeatahuan Indonesia mengembangkan sistem panas bumi pemanfaatan langsung pertama di Indonesia—proyek panen jamur di lapangan panas bumi Kamojang di Jawa Barat.[16] Pada saat itu, kerangka kerja panas bumi Indonesia, UU No. 27/2003, hanya menyebutkan pemanfaatan langsung sebanyak satu kali.[17] Sayangnya, 15 tahun kemudian, pemanfaatan langsung panas bumi masih relatif kurang. Meskipun kaya akan sumber daya bawah tanah, survei total megawatt penggunaan termal menempatkan Indonesia di peringkat ke-74 dari 88 negara yang disurvei.[18] (Lihat Bab 4, " Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung," untuk informasi lebih lanjut.)

Yang lebih mencengangkan lagi, analisis yang dilakukan oleh Project InnerSpace menunjukkan bahwa Indonesia memiliki potensi panas bumi ribuan gigawatt di seluruh



negeri. Temuan ini sejalan dengan analisis yang dijelaskan dalam Bab 4, "Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung," yang menunjukkan bahwa panas bumi dapat secara efektif memenuhi 66,5% dari permintaan termal Indonesia pada tahun 2030—yang akan menjadi 44% dari target iklim nasional. Terlebih lagi, sumber daya ini dapat memenuhi hampir 90% dari permintaan termal negara pada tahun 2050. Kurangnya pemanfaatan langsung panas bumi di Indonesia saat ini tidaklah mengejutkan: Meskipun Undang-Undang No. 21/2014 mencantumkan empat kategori potensi aplikasi penggunaan langsung panas bumi untuk memandu pengembang (pariwisata, agribisnis, industri, dan kegiatan lainnya),[19] peraturan tersebut memprioritaskan pengembangan panas bumi untuk penggunaan *tidak langsung*—dengan kata lain, untuk pembangkitan listrik.[20] Selain itu, Peraturan Pemerintah No. 25/2021 mencantumkan 13 kewajiban bagi pemegang Izin Usaha Panas Bumi. Pengembangan penggunaan langsung berada di urutan ke-12 dalam daftar tersebut.[21]

Meskipun Indonesia telah mengeluarkan peraturan dan pedoman penting untuk merangsang pertumbuhan ekonomi lokal dan mendorong transisi energi nasional,[22,23] sebagian besar masih bersifat prosedural dan tidak menciptakan kondisi yang memungkinkan yang diperlukan untuk penerapan komersial skala besar dari energi panas bumi untuk penggunaan langsung.

Menciptakan kondisi yang memungkinkan penggunaan energi panas bumi secara langsung akan menjadi langkah yang berdampak bagi Indonesia. Peta jalan kebijakan yang diuraikan dalam bab ini mencakup beberapa rekomendasi yang akan membantu Indonesia menerapkan energi panas bumi secara langsung, baik untuk pendinginan perkotaan maupun aplikasi pemanasan industri di seluruh negeri. Dengan demikian, kualitas udara, kesehatan warga, dan pencapaian tujuan iklimnya akan meningkat secara bersamaan.

REKOMENDASI KEBIJAKAN

Sepuluh rekomendasi dalam bab ini menawarkan perpaduan ide jangka pendek, menengah, dan panjang tentang bagaimana Indonesia dapat membuka lebih banyak potensi panas bumi di seluruh negeri. Salah satu langkah terpenting yang dapat diambil Indonesia saat ini adalah menerapkan Rekomendasi 1, yang akan menetapkan kerangka hukum untuk proyek panas bumi generasi baru dan memperjelas penggunaan panas bumi untuk pemanasan dan pendinginan industri.

Rekomendasi 1: Perbarui undang-undang panas bumi untuk secara jelas membahas energi panas bumi generasi baru dan penggunaan langsung.

Pihak yang Bertindak: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral serta Direktorat Jenderal Pertambangan dan Batubara; Dewan Perwakilan Rakyat Republik Indonesia

Undang-Undang Panas Bumi Indonesia No. 21/2014 memberikan landasan hukum utama untuk pengembangan panas bumi, tetapi undang-undang tersebut ditulis untuk sistem hidrotermal konvensional. Sejak undang-undang tersebut disahkan, teknologi generasi baru telah bermunculan—seperti sistem panas bumi rekayasa dan sistem panas bumi canggih—yang menggunakan reservoir rekayasa, sumur tertutup, atau metode pertukaran panas canggih dan tidak lagi bergantung pada ladang hidrotermal alami (Lihat Bab 1, "Panas Bumi 101: Gambaran Umum Teknologi dan Aplikasi"). Namun, hukum Indonesia masih mendefinisikan sumber daya panas bumi sebagian besar sebagai air dan uap bawah tanah, sehingga teknologi baru ini berada di luar cakupan legislatif negara dan menciptakan ketidakpastian untuk perizinan, investasi, dan perlindungan lingkungan untuk proyek pembangkit listrik panas bumi generasi baru.

Pada saat yang sama, permintaan energi Indonesia bergeser dengan cepat ke arah pemanasan dan pendinginan. Banyak klaster industri sangat bergantung pada pemanasan suhu rendah hingga menengah (kurang dari 225°C), dan permintaan pendinginan perkotaan diproyeksikan akan meningkat tajam. Saat ini, proyek pemanfaatan langsung panas bumi—pemanasan industri dan pendinginan skala distrik—kurang memiliki dasar hukum yang jelas yang memperlakukannya sebagai infrastruktur energi yang setara dengan pembangkit listrik. Pemerintah juga kekurangan kerangka peraturan yang jelas yang mengatur penggunaan air garam panas



bumi dan panas berlebih untuk tujuan pemanfaatan langsung komersial. Tanpa kerangka kerja tersebut, pengembang menghadapi ambiguitas terkait penetapan harga, insentif, dan integrasi perencanaan.

Untuk mengatasi kesenjangan ini, Undang-Undang No. 21/2014 perlu diubah untuk mendefinisikan energi panas bumi. Definisi saat ini adalah sebagai berikut: "Energi panas bumi berarti sumber energi termal yang terkandung dalam air panas, uap, dan batuan beserta mineral terkait dan gas lain yang secara genetik tidak dapat dipisahkan dalam sistem panas bumi."

Untuk secara jelas membahas energi panas bumi generasi baru dan penggunaan langsung, definisi ini dapat diubah menjadi berikut: "Energi panas bumi berarti energi termal yang berasal dari bawah permukaan bumi, terlepas dari media transfer atau metode ekstraksinya, termasuk tetapi tidak terbatas pada uap dan air panas yang terjadi secara alami, reservoir yang distimulasi secara buatan, sistem tertutup, dan teknologi panas bumi canggih lainnya." Definisi ini harus secara eksplisit mencakup metode pemanenan panas saat ini dan di masa mendatang untuk memastikan kejelasan regulasi, kepastian

EKSTRAKSI MINERAL KRITIS DARI AIR GARAM PANAS BUMI

Hukum Indonesia mendefinisikan pengembangan panas bumi dan penambangan mineral sebagai dua kegiatan yang berbeda.[31] Namun, eksplorasi panas bumi, khususnya dari sistem panas bumi konvensional, juga dapat menghasilkan mineral penting seperti litium, silika, dan unsur tanah jarang yang terlarut dalam air garam panas bumi. Air garam ini berpotensi menjadi sumber litium yang padat; air garam tersebut mengandung konsentrasi hingga 60 ppm,[32] dibandingkan dengan konsentrasi litium 0,2 ppm dari air laut (Silika juga dapat diekstrak dari lumpur panas bumi.[33])

Mineral yang diekstrak dari fluida panas bumi dapat digunakan untuk pertanian dan industri kosmetik. Di Islandia, beberapa produk perawatan kulit dan suplemen, yaitu MýSilica dan GeoSilica, berasal dari air hasil sampingan pembangkit listrik panas bumi.

Di Indonesia, beberapa inisiatif penelitian yang berfokus pada produk sampingan panas bumi untuk sektor pertanian sedang berlangsung. Katrili dan Sulasih-Sulanjana adalah produk peningkat pupuk yang dikembangkan melalui kolaborasi antara Universitas Gadjah Mada dan PT Pertamina Geothermal Energy, serta PT Geo Dipa Energi (Persero).[34] Produk-produk ini menggunakan silika nanopartikel untuk memperkuat ketahanan tanaman terhadap hama dan meningkatkan retensi kelembaban tanah. Produk-produk ini telah menunjukkan hasil yang menjanjikan, dengan petani lokal melaporkan hasil panen yang lebih besar dan lebih tahan terhadap penyakit, serta peningkatan stabilitas tanaman secara keseluruhan.

Kebutuhan lithium di Indonesia terus meningkat. Misalnya, Indonesia menargetkan 2 juta mobil listrik dan 13 juta sepeda motor listrik pada tahun 2030, yang berarti Indonesia membutuhkan ratusan ribu ton lithium dalam lima tahun ke depan.[35] Ekstraksi lithium dari air garam panas bumi berdampak lingkungan lebih rendah daripada penambangannya dari dalam bumi.

Dalam memperbarui undang-undangnya, pemerintah harus mengakui penambangan mineral sebagai kegiatan bersama yang diperbolehkan dalam konsesi panas bumi dan membuat peraturan khusus untuk mengizinkan penambangan mineral dari air garam panas bumi.

Bersamaan dengan reformasi hukum yang telah diuraikan, pemerintah juga harus menawarkan prosedur perizinan yang lebih sederhana yang memungkinkan operator panas bumi untuk mengajukan hak penambangan mineral berdasarkan konsesi yang sudah ada, daripada memerlukan izin terpisah. Insentif fiskal seperti pembebasan bea impor untuk teknologi pemulihan mineral dapat mengurangi risiko keuangan untuk proyek-proyek tahap awal.



investasi, dan keselarasan dengan kemajuan teknologi global. Secara paralel, revisi Peraturan Pemerintah No. 7/2017 harus mengintegrasikan teknologi ini ke dalam kerangka perizinan dan penetapan harga untuk aplikasi pembangkit listrik dan penggunaan langsung. Undang-undang yang diubah juga harus menetapkan sistem penggunaan langsung panas bumi sebagai "infrastruktur prioritas," sehingga memenuhi syarat untuk perizinan yang disederhanakan, tarif yang diatur, dan dukungan perencanaan terkoordinasi di bawah kebijakan infrastruktur nasional Indonesia.[24]

Selain mengubah definisi panas bumi dan memberikan status infrastruktur prioritas kepada proyek-proyek penggunaan langsung, pemerintah dapat mengambil beberapa langkah konkret lainnya untuk mengoperasionalkan rekomendasi ini, termasuk hal-hal berikut:

- **Membangun kerangka tarif nasional untuk panas dan pendinginan geotermal—**dengan tolok ukur terhadap bahan bakar fosil yang digantikan—dan menggabungkan kerangka tersebut dengan pajak pertambahan nilai (PPN) dan keringanan bea cukai untuk sistem dan komponen pendingin geotermal di zona yang ditentukan, dengan mengambil model dari jaringan pemanas distrik geotermal Turki[25] dan tarif yang diatur di Cekungan Paris, Prancis.[26]
- **Memperkenalkan perjanjian pasokan panas dan pendingin (H&CSA) yang terstandarisasi** dengan penetapan harga berdasarkan indeks, kewajiban pengambilan minimum, dan komitmen jangka panjang—yang dimodelkan berdasarkan praktik terbaik internasional[27]—untuk memastikan kelayakan pembiayaan, transparansi harga, dan pengiriman panas yang andal.
- **Menerapkan aturan hak jalan dan koneksi** untuk saluran termal dan pipa bawah tanah, yang dimodelkan berdasarkan kerangka kerja pemanasan distrik Eropa untuk memungkinkan integrasi ke dalam perencanaan perkotaan dan industri.
- **Pendanaan ditargetkan untuk proyek-proyek percontohan** guna mendorong penggunaan langsung pemanas ruangan, pendinginan geotermal, dan proyek pembangkit listrik generasi baru, yang dapat membantu menunjukkan kelayakan, membangun kepercayaan investor, dan mempercepat implementasi.

Pemerintah daerah juga harus memainkan peran sentral dalam perencanaan pemanfaatan langsung energi panas bumi, menyesuaikan implementasinya dengan kebutuhan industri, masyarakat, dan pariwisata regional. Peraturan Daerah Provinsi Lampung Nomor 11/2019 tentang penggunaan air permukaan menggambarkan bagaimana provinsi dapat memimpin dengan menciptakan kerangka fiskal dan tata kelola—menentukan siapa yang membayar, bagaimana biaya dihitung, dan bagaimana pendapatan dialokasikan.[28] Model serupa dapat menetapkan sistem perizinan dan registrasi untuk sumur dan pipa pemanfaatan langsung; menetapkan biaya penggunaan atau royalti berdasarkan panas yang diekstraksi, jenis aplikasi, dan skala; dan menyalurkan pendapatan ke infrastruktur masyarakat, kawasan industri regional, dan fasilitas ekowisata. Regulasi nasional kemudian dapat mereplikasi dan menstandarisasi pendekatan ini di seluruh Jawa, Sumatera, dan wilayah lain dengan permintaan panas yang tinggi. (Lihat Bab 4, "Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung.")

Menerbitkan regulasi tingkat tinggi untuk penggunaan langsung panas bumi dan meningkatkan "dorongan dan/atau prioritas penggunaan langsung panas bumi di WKP" dalam Peraturan Pemerintah No. 25/2021[29] akan mengirimkan sinyal yang jelas bahwa Indonesia bermaksud memperlakukan panas industri dan pendinginan bangunan dengan kepentingan strategis yang sama seperti listrik. Tindakan ini dapat menciptakan kepastian kebijakan yang dibutuhkan untuk investasi skala besar[30] dan memberi sinyal kepada mitra domestik dan internasional bahwa Indonesia bermaksud membuka peluang baru untuk daya saing industri, ketahanan nasional, dan kedaulatan hijau.



Rekomendasi 2: Tetapkan Target Nasional untuk Listrik Panas Bumi dan Panas Industri serta Jalur untuk Mencapainya

Pihak yang Bertindak: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Mineral serta Direktorat Jenderal Kelistrikan; PLN

Dua langkah terkait yang dapat diambil Indonesia adalah (i) menetapkan target nasional yang terkoordinasi untuk listrik panas bumi yang stabil dan panas bumi untuk penggunaan langsung—pilar pelengkap yang dapat mengurangi penggunaan batubara, menstabilkan jaringan listrik, dan mendekarbonisasi industri—dan (ii) memperkenalkan jalur pengadaan yang bersih dan stabil dalam Rencana Usaha Penyediaan Listrik (RUPTL) PLN untuk memastikan jalur pencapaian tujuan tersebut.

Berdasarkan potensi teknis yang dibahas dalam laporan ini, kami merekomendasikan target 15 gigawatt listrik dan 15 gigawatt panas termal pada tahun 2035, yang kemudian ditingkatkan menjadi 25 gigawatt listrik dan 35 gigawatt panas termal pada tahun 2045. Target yang saling terkait ini menyelaraskan pengadaan, perencanaan, dan pembiayaan sehingga pembangkit listrik dan panas dapat tumbuh bersama.

Untuk membantu memastikan negara mencapai target ini, pemerintah dapat menciptakan jalur pengadaan yang jelas di dalam RUPTL PLN dengan pemberian kapasitas multi-tahun yang dikhususkan untuk energi panas bumi dan alokasi khusus untuk sistem generasi baru. Meskipun harga batas atas yang ditetapkan berdasarkan Peraturan Presiden No. 112/2022 lebih tinggi daripada biaya pasokan listrik rata-rata saat ini, banyak pengembang masih menganggap harga tersebut tidak cukup untuk merangsang investasi, dengan mencatat bahwa tingkat pengembalian internal sekitar 14% sering kali dibutuhkan untuk proyek panas bumi. Selain itu, pembangkit listrik panas bumi harus menerima kredit kapasitas sebesar atau di atas 90% untuk mencerminkan keandalannya selama 24 jam, dengan pembayaran bonus untuk ketersediaan yang tinggi.

Sejalan dengan komitmen Indonesia untuk menghapuskan pembangkit listrik tenaga batu bara—terutama Peraturan Menteri ESDM No. 10/2025 tentang Peta Jalan Transisi Energi di Sektor Kelistrikan,[36] yang mewajibkan penghentian dini pembangkit listrik tenaga batu bara—energi panas bumi harus diakui sebagai pilar utama transisi tersebut. Penggunaan kembali atau penempatan fasilitas panas bumi generasi baru di lokasi pembangkit listrik tenaga batu bara yang ada dapat menjaga stabilitas jaringan dan nilai infrastruktur sekaligus memajukan agenda penghapusan bertahap nasional.[37] Beberapa pembangkit listrik tenaga batu bara di Indonesia berada di atas sumber panas bumi yang tinggi dan merupakan kandidat awal untuk penelitian lebih lanjut. (Untuk detail lebih lanjut, lihat Bab 2, "Menggerakkan Transisi: Pasar dan Peluang Panas Bumi Indonesia")

Rekomendasi 3: Industri pembangkit listrik dan pusat data menggunakan panas dan pendinginan geotermal.

Pihak yang Bertindak: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral serta Direktorat Jenderal Kelistrikan; Kementerian Perindustrian; Kementerian Komunikasi dan Digital

Peluang panas bumi terbesar dan paling mendesak di Indonesia terletak pada pemenuhan permintaan energi termal secara bersih dan efisien. Pada tahun 2023, permintaan panas industri dan proses mencapai 2.998.059 terajoule, menghasilkan sekitar 241 juta metrik ton emisi karbon dioksida —hampir seperempat dari total emisi terkait energi di Indonesia. Seperti yang dibahas dalam Bab 4: "Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung," jika energi panas bumi dan solusi panas bersih lainnya mampu mengurangi dua pertiga dari permintaan termal ini pada tahun 2030, penghematan emisi dapat mencapai hampir 160 juta metrik ton karbon dioksida—44% dari janji pengurangan emisi Indonesia pada tahun 2030 di sektor energi dan industri. Kontribusi yang Ditentukan Secara Nasional (NDC) belum menetapkan kuota khusus energi untuk jalur net-zero Indonesia pada tahun 2060, tetapi pemanfaatan langsung energi panas bumi dapat mengurangi 90% dari permintaan termal pada tahun 2060, sebuah pengurangan yang signifikan secara nasional. Dengan kata lain, energi panas bumi untuk pendinginan dan penyediaan panas industri merupakan pengungkit penting bagi Indonesia untuk mencapai tujuan energinya.



Tempat ideal untuk memulai pekerjaan ini dan mendorong penerapan panas bumi dalam skala besar adalah di klaster industri dan pusat data. Industri seperti tekstil, makanan dan minuman, pulp dan kertas, serta kimia semuanya menggunakan panas proses dengan suhu di bawah 250°C—ideal untuk panas bumi. Selain itu, ekonomi digital Indonesia yang berkembang pesat mendorong pertumbuhan eksponensial pusat data yang intensif energi, yang membutuhkan pendinginan sepanjang tahun yang sangat andal dan dapat dipasok secara efisien melalui sistem panas bumi dan air tambang.

Selain pembaruan hukum dan peraturan yang disarankan dalam Rekomendasi 1, pemerintah dapat mengambil beberapa langkah konkret lainnya untuk mengoperasionalkan rekomendasi ini, termasuk di bidang-bidang berikut:

- **Zonasi termal dan mandat:** Kementerian ESDM dan Kementerian Perindustrian, bersama dengan pemerintah provinsi, harus menetapkan zona prioritas panas bumi di kawasan industri utama dan distrik perkotaan; mengamankan hak jalan untuk perpipaan sebagaimana diamanatkan berdasarkan undang-undang tata guna lahan dan infrastruktur regional; dan mewajibkan pengguna panas baru dalam skala besar untuk berlokasi di, atau terhubung ke, sistem ini.
- **Pendanaan:** Melalui Dana Penjaminan Infrastruktur Indonesia, PT SMI, dan bank-bank milik negara, menawarkan pinjaman lunak dan jaminan kredit untuk jaringan termal bersama dan renovasi, termasuk pembentukan Badan Usaha Khusus (Special Purpose Vehicle/SPV) gabungan di tingkat kawasan industri dan distrik perkotaan untuk mengumpulkan kredit.
- **Pengadaan publik dan penentuan lokasi proyek:** Mewajibkan pusat data dan kawasan industri yang didukung pemerintah yang sedang dikembangkan untuk mengadopsi standar desain yang siap untuk energi panas bumi dan memprioritaskan integrasi sistem panas bumi saat menentukan lokasi proyek guna memenuhi persyaratan sertifikasi ramah lingkungan.
- **Proyek percontohan yang dapat direplikasi:** Danai antara tiga hingga lima klaster industri unggulan (di Jawa, Sumatra, dan Sulawesi) dan dua atau tiga kampus pusat data berpendingin panas bumi, menyediakan H&CSA (Analisis Keamanan dan Kontrol) yang terstandarisasi, aturan teknis dan prosedural yang mendefinisikan cara pengguna akhir terhubung ke jaringan bersama, dan protokol pemantauan—sehingga menciptakan templat nasional yang dapat direplikasi.

Dengan menyelaraskan klaster industri dan pusat data dengan pasokan panas bumi, Indonesia dapat menghasilkan gigawatt pertama dari pemanfaatan panas langsung pada dekade ini. Akibatnya, Indonesia akan mengurangi impor bahan bakar, menstabilkan biaya energi, dan membantu memposisikan diri untuk mencapai hingga sepertiga dari komitmennya pada tahun 2030 dan sebagian besar dari tujuan iklimnya pada tahun 2050–2060.

PUSAT DATA BERTENAGA PANAS BUMI: JALAN INDONESIA MENUJU EKONOMI DIGITAL HIJAU

Menempatkan pusat data bersamaan dengan sumber daya panas bumi menawarkan sumber daya listrik langsung, selalu aktif, dan bersih di lokasi. Analisis terbaru yang berbasis di AS menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat memangkas biaya listrik rata-rata antara 31% dan 45% dibandingkan dengan model tradisional yang bergantung pada jaringan listrik.[38] Dengan perusahaan teknologi global yang berlomba untuk mengamankan daya rendah karbon 24/7 untuk pusat data, hanya sedikit negara yang memiliki potensi—dan keahlian—lebih besar daripada Indonesia.

Per Agustus 2024, PLN melayani 128 pelanggan pusat data dengan beban hampir 1 gigawatt. Permintaan diproyeksikan mencapai 4 gigawatt pada tahun 2033.[39] Pertumbuhan pesat AI dapat mempercepat permintaan tersebut hingga dua atau tiga kali lipat. Dengan sumber daya panas bawah permukaan yang luar biasa, Indonesia



memiliki kemampuan unik untuk memenuhi—dan bahkan melampaui—permintaan ini. Saat ini, beberapa aktivitas pusat data yang ada tumpang tindih dengan produksi panas bumi konvensional, tetapi pusat beban digital yang tumbuh paling cepat terletak di daerah-daerah di mana teknologi panas bumi generasi baru mulai berperan.

Alat Project InnerSpace GeoMap Beta menyoroti zona luas dengan sumber daya panas bumi yang menguntungkan yang terletak tepat di bawah koridor pusat data yang sedang berkembang di Indonesia—Jakarta, Purwakarta, Surabaya, Batam, dan Medan.[40] Kesesuaian ini dapat memungkinkan pembangkitan panas bumi di luar jaringan listrik di dekat simpul serat optik dan industri utama, menyediakan daya beban dasar yang andal dan rendah karbon tepat di tempat yang dibutuhkan.

Menyelaraskan Energi dan Pertumbuhan Digital

- Di **Jawa**, Koridor Jakarta–Purwakarta memiliki konsentrasi pusat data tertinggi di Indonesia—dan memiliki beberapa potensi energi bawah tanah terbaik di Indonesia.
- Di **Surabaya,** sumber daya panas bumi yang kuat dapat menjadi landasan pengembangan pusat data ramah lingkungan, sementara interkoneksi kabel bawah laut dapat memperluas kapasitas digital dan energi ini ke pusat-pusat yang sedang berkembang di Kalimantan Selatan dan Makassar.
- Di **Sumatra,** sumber daya panas bumi sejajar dengan node fiber di Lampung dan Medan, menciptakan potensi untuk pusat data yang ditenagai oleh energi panas bumi.
- Di **Kepulauan Riau (Batam),** sumber daya panas bawah permukaan menjadikan kepulauan ini lokasi paling strategis di Indonesia untuk pusat data geotermal generasi baru karena Singapura, yang berada di sebelahnya, dibatasi oleh keterbatasan lahan dan energi terbarukan serta sedang mencari cara untuk mempertahankan posisinya sebagai pusat data global. Sistem geotermal generasi baru di Batam dapat memberikan daya beban dasar yang andal dan latensi sangat rendah untuk salah satu node fiber paling penting di Asia.

Gabungan antara permintaan dan sumber daya ini menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan potensi terbesar di dunia untuk infrastruktur digital bertenaga panas bumi.

Jalur Kebijakan dan Insentif

Pemerintah Indonesia dapat mengambil langkah-langkah tegas sebagai berikut untuk mempercepat integrasi energi panas bumi di sektor pusat data:

- **Mandat integrasi panas bumi:** Elektrifikasi 50% dari beban pusat data baru atau yang sedang diperluas dalam satu atau dua tahun ke depan, sejalan dengan Peraturan Presiden No. 112/2022 tentang tarif energi terbarukan.
- **Manfaatkan panas bumi untuk pendinginan:** Penuhi 50% kebutuhan pendinginan melalui panas bumi menggunakan model saluran langsung (kabel pribadi), terutama di Jawa dan Sumatera.
- **Ciptakan insentif fiskal:** Tawarkan keringanan pajak bertingkat berdasarkan pengeluaran modal atau beban energi dan pembebasan PPN atau bea impor untuk peralatan panas bumi dan pendingin seperti alat pengeboran, unit Siklus Rankine Organik, pendingin absorpsi, pompa, penukar panas, perangkat keras pendingin celup, dan banyak lagi.
- **Mendukung kolokasi dan pengelompokan:** Bangun kawasan industri panas bumi di dekat zona beban utama, dan berikan pengurangan pajak tanah dan bangunan untuk pusat data yang terletak di atas—atau dalam jarak 20 kilometer dari—lapangan panas bumi.
- **Tawarkan insentif fleksibel di luar lokasi:** Perpanjang PPA khusus atau manfaat parsial untuk pengguna tenaga panas bumi di luar lokasi.

Dengan arahan regulasi yang kuat, insentif fiskal yang tepat sasaran, dan eksplorasi berkelanjutan terhadap teknologi panas bumi generasi baru, Indonesia dapat mengubah potensi panas buminya menjadi fondasi masa depan Asia yang bersih dan terhubung.



Rekomendasi 4: Jadikan panas bumi sebagai inti pendinginan untuk pembangunan perkotaan

Pihak yang Bertanggung Jawab: Kementerian Agraria dan Tata Ruang; Kementerian Pekerjaan Umum; Kementerian Perumahan dan Kawasan Permukiman; Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional

IEA memproyeksikan bahwa antara tahun 2021 dan 2030, Indonesia akan menambah lebih dari 2 miliar meter persegi perumahan baru. Lembaga tersebut juga memproyeksikan bahwa pada tahun 2030, jumlah rumah tangga dengan unit pendingin udara kemungkinan akan melonjak dari sekitar 1 dari 10 menjadi lebih dari 1 dari 3.[41] Secara paralel, Rencana Aksi Pendinginan Nasional Indonesia (I-NCAP) memperkirakan bahwa penggunaan listrik untuk pendinginan akan meningkat dari 79 terawatt-jam pada tahun 2020 menjadi 183 terawatt-jam pada tahun 2030 dan sekitar 265 terawatt-jam pada tahun 2040.[42] (Lihat Bab 2, Menggerakkan Transisi: Pasar dan Peluang Panas Bumi Indonesia). I-NCAP menekankan solusi pasif dan berbasis distrik untuk menekan emisi dari sektor pendinginan, dengan menyoroti peran sistem panas bumi dalam menyediakan pendinginan berkelanjutan dan rendah karbon dengan kebutuhan beban listrik puncak yang jauh lebih rendah.

Kementerian Agraria dan Tata Ruang, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan, Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas), Kementerian ESDM (sebagai koordinator sektor energi), dan pemerintah provinsi dapat mengambil langkah-langkah konkret berikut untuk mengoperasionalkan rekomendasi ini:

- **Tetapkan zona pendinginan geotermal** di daerah padat penduduk, kawasan industri, dan pembangunan baru (termasuk Nusantara), dengan menyediakan koridor pipa dan ruang sumur bor bersama.
- **Persyaratan desain yang siap untuk energi panas bumi** dalam standar kota dan proyek publik atau komersial berskala besar.
- **Integrasikan sistem pendinginan distrik** ke dalam rencana induk perkotaan. dan aturan pengadaan, menggunakan kode koneksi standar, H&CSA.

Pendinginan geotermal harus ditetapkan sebagai prinsip desain inti ibu kota baru untuk menopang pertumbuhan awal kota tersebut. Otoritas Ibu Kota Nusantara, bekerja sama dengan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan serta Bappenas, harus mengadopsi proyek percontohan pendinginan distrik geotermal, yang akan mengurangi permintaan listrik selama jam puncak, menurunkan emisi, dan menunjukkan model yang dapat diskalakan dan direplikasi untuk kota-kota lain.

Dengan memasukkan pendinginan geotermal ke dalam kerangka perencanaan, Indonesia dapat menjaga kota-kota tetap layak huni tanpa membebani jaringan listrik. Jika hanya 10% dari proyeksi kebutuhan pendinginan Indonesia pada tahun 2040 dipenuhi dengan energi geotermal, bukan pendingin udara konvensional, Indonesia dapat menghindari hingga 130 terawatt-jam (lihat **Gambar 7.2**) dari puncak permintaan listrik dan puluhan juta ton emisi karbon dioksida setiap tahunnya—setara dengan menonaktifkan beberapa pembangkit listrik tenaga batu bara. Perkiraan ini didasarkan pada proyeksi nasional bahwa pendinginan dapat berkontribusi lebih dari 100 gigawatt terhadap beban puncak pada tahun 2040,[43] dan mengasumsikan substitusi konservatif sebesar 10% dengan sistem pendinginan geotermal berdaya rendah. (Lihat Bab 4, "Melampaui Listrik: Kebutuhan Energi Termal dan Potensi Pemanfaatan Langsung.")

Dengan memperlakukan pendinginan geotermal sebagai infrastruktur perkotaan prioritas, Indonesia dapat memenuhi kebutuhan pendinginan yang meningkat tanpa membebani sistem tenaga listrik. Perencanaan dan zonasi sejak dini akan mengurangi biaya dibandingkan dengan renovasi bangunan yang sudah ada, sekaligus memastikan bahwa penduduk perkotaan tetap terlindungi dari kenaikan suhu dan risiko gelombang panas.

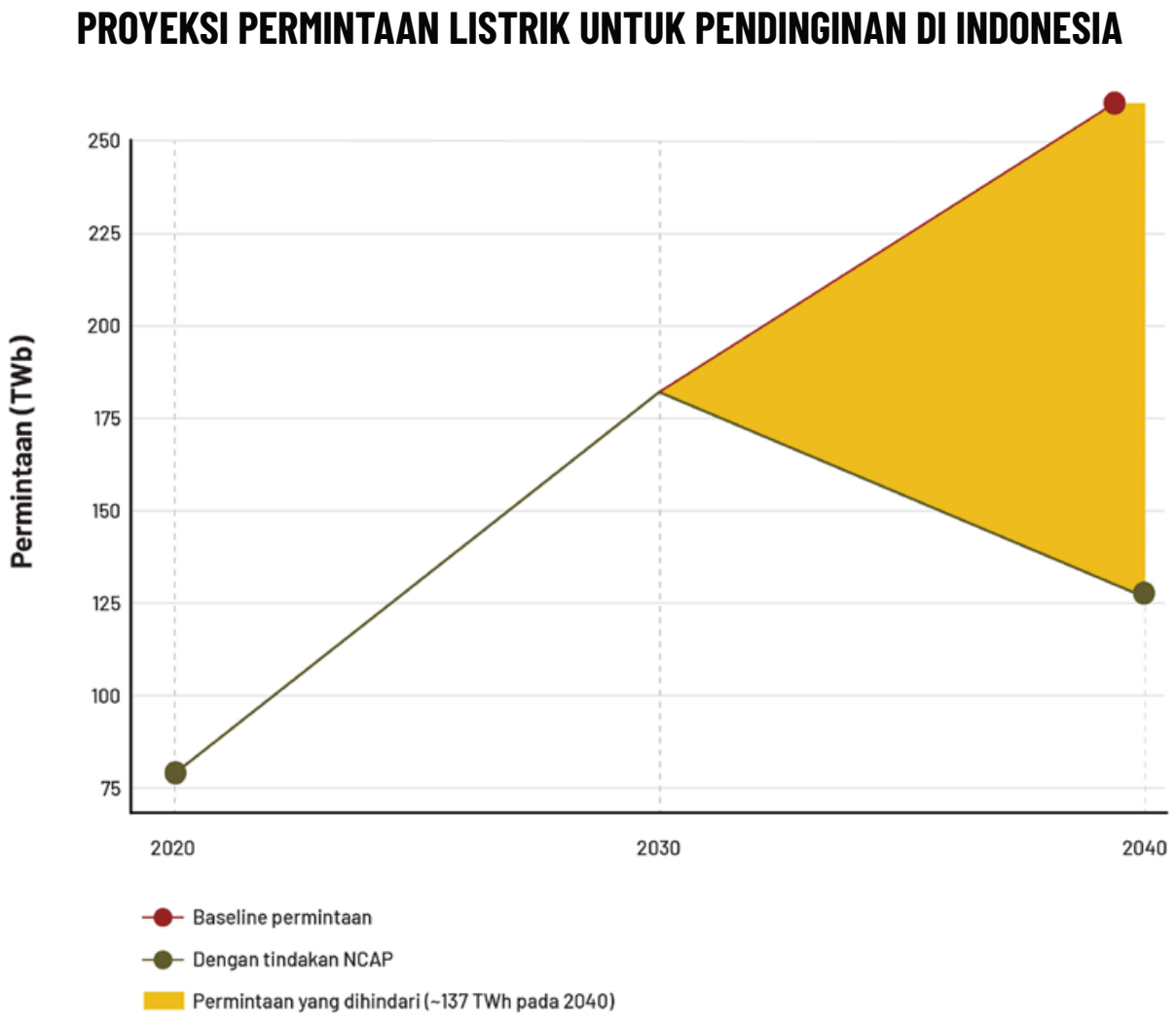
Rekomendasi 5: Buat jalur cepat untuk proses perizinan, koordinasi administratif, dan prosedur lainnya.

Pihak yang Bertindak: Kementerian Investasi dan Industri Hilir; Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral; dan Direktorat Jenderal Kelistrikan.

Indonesia telah mengambil langkah penting dengan sistem OSS-nya yang memusatkan perizinan investasi



lintas sektor, tetapi sistem tersebut lebih berfungsi sebagai platform perantara daripada otoritas satu pintu yang sesungguhnya, dan proyek panas bumi masih menghadapi penundaan bertahun-tahun. Proses untuk mendapatkan izin penting seperti izin lingkungan, persetujuan penggunaan hutan, hak atas tanah, dan izin air tetap terfragmentasi di berbagai lembaga dan tingkat pemerintahan. Mengintegrasikan perizinan panas bumi ke dalam jalur OSS yang terpadu dan terdelegasikan akan menyederhanakan perizinan investasi dan mengubah koordinasi administratif menjadi katalis untuk percepatan penyelesaian proyek. Pemerintah harus menetapkan jalur cepat khusus panas bumi dalam sistem OSS, memberikan peran khusus kepada Kementerian ESDM sebagai titik koordinasi tunggal untuk perizinan panas bumi dalam eksplorasi, penetapan Wilayah Kerja, dan produksi. Kementerian ESDM akan berkoordinasi langsung dengan Kementerian Lingkungan Hidup, Kementerian Kehutanan, Kementerian Agraria dan Tata Ruang, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan, Kementerian Investasi, serta pemerintah provinsi dan kabupaten. Proses ini juga harus mengakui bahwa beberapa proyek memiliki risiko lebih rendah



Gambar 7.2: Menempatkan pendinginan distrik geotermal sebagai teknologi utama untuk zona-zona tertentu dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi pendinginan nasional. Sumber: Diadaptasi dari Komisi Ekonomi dan Sosial Perserikatan Bangsa-Bangsa untuk Asia dan Pasifik (UNESCAP) & Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEP). (2024, 6 Agustus). *Indonesia menetapkan jalur untuk pendinginan ramah iklim dengan Rencana Aksi Pendinginan Nasional (I-NCAP)*.

daripada yang lain. Proyek-proyek kecil dan proyek-proyek yang melibatkan pengeboran di daerah yang sudah berkembang memiliki risiko lebih rendah daripada proyek-proyek besar di daerah berhutan. Pendekatan bertingkat untuk persetujuan akan mengakui fakta ini.

Untuk memastikan akuntabilitas, undang-undang harus memperkenalkan jangka waktu perizinan yang ditetapkan secara hukum—batas waktu tetap bagi lembaga untuk memproses permohonan, dengan persetujuan otomatis jika lembaga tersebut melewatkan batas waktu tanpa alasan. Jangka waktu 180 hari yang ditetapkan secara hukum untuk proyek panas bumi akan secara signifikan mengurangi waktu tunggu, meningkatkan kepercayaan investor, dan menyelaraskan proses di Indonesia dengan standar terbaik internasional untuk infrastruktur energi terbarukan.

Dalam sistem OSS Indonesia, kegiatan panas bumi saat ini berada di bawah KBLI 06202 untuk eksplorasi dan ekstraksi panas bumi[44] dan KBLI 35111 untuk pembangkitan listrik dari sumber panas bumi.[45] KBLI untuk proyek penggunaan langsung berada di bawah lingkup dua klasifikasi utama ini, dengan 16 lisensi khusus untuk penggunaan panas. Namun, tidak ada KBLI khusus untuk penggunaan langsung panas bumi yang memungkinkan industri untuk mengajukan KBLI baru seiring kemajuan teknologi. Misalnya, saat ini tidak ada KBLI untuk perizinan pompa panas sumber tanah. Setelah Kementerian ESDM mengeluarkan peraturan yang menetapkan dasar hukum untuk kegiatan penggunaan langsung—seperti dengan memperbarui Peraturan Menteri ESDM No. 5/2021,[46] sebagaimana dijelaskan dalam Rekomendasi 1—Kementerian ESDM dapat secara resmi berkoordinasi dengan Badan Pusat Statistik untuk membuat klasifikasi KBLI baru yang khusus untuk penggunaan langsung panas bumi. Urutan ini akan memastikan bahwa klasifikasi baru tersebut didasarkan pada mandat peraturan yang jelas dan selaras dengan kerangka kerja perizinan nasional Indonesia. Akibatnya, investor kemudian dapat mendaftarkan proyek penggunaan langsung melalui sistem OSS, mengakses jalur perizinan, dan memenuhi syarat untuk insentif sektoral di bawah kerangka investasi Indonesia.

PERIZINAN UNTUK PEMANFAATAN LANGSUNG

Untuk semua proyek pemanfaatan langsung energi panas bumi, perizinan merupakan langkah penting untuk memastikan kepatuhan terhadap peraturan, keandalan teknis, dan keselamatan operasional.

Di Indonesia, perizinan untuk proyek pemanfaatan langsung panas bumi diatur berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 5 Tahun 2021 tentang Standar dan Produk Kegiatan Usaha dalam Pelaksanaan Perizinan Berbasis Risiko di Sektor Energi dan Sumber Daya Mineral.[47] Pengembang yang memegang izin panas bumi harus memperoleh sertifikat yang membuktikan kelayakan operasional untuk aplikasi pemanfaatan langsung. Pengajuan sertifikat ini dilakukan melalui sistem OSS (**Gambar 7.3**) ke Direktorat Jenderal Energi Baru, Energi Terbarukan dan Konservasi Energi atau kantor energi provinsi/kabupaten terkait.

Meskipun pengamanan ini penting, proses perizinan memainkan peran penting dalam menentukan bagaimana pengembangan panas bumi berlangsung. Untuk mendukung visi bab ini dalam memperluas penggunaan langsung panas bumi, pemerintah dapat memperkuat kerangka kerja perizinan agar lebih memberdayakan. Langkah ini dapat mencakup prosedur yang lebih jelas, peran kelembagaan yang terdefinisi dengan baik, dan koordinasi yang efisien sambil tetap mempertahankan kemampuan personel yang ketat serta standar keselamatan dan lingkungan.

Pemerintah dapat mengambil beberapa langkah konkret selanjutnya untuk mengoperasionalkan rekomendasi ini, termasuk hal-hal berikut:

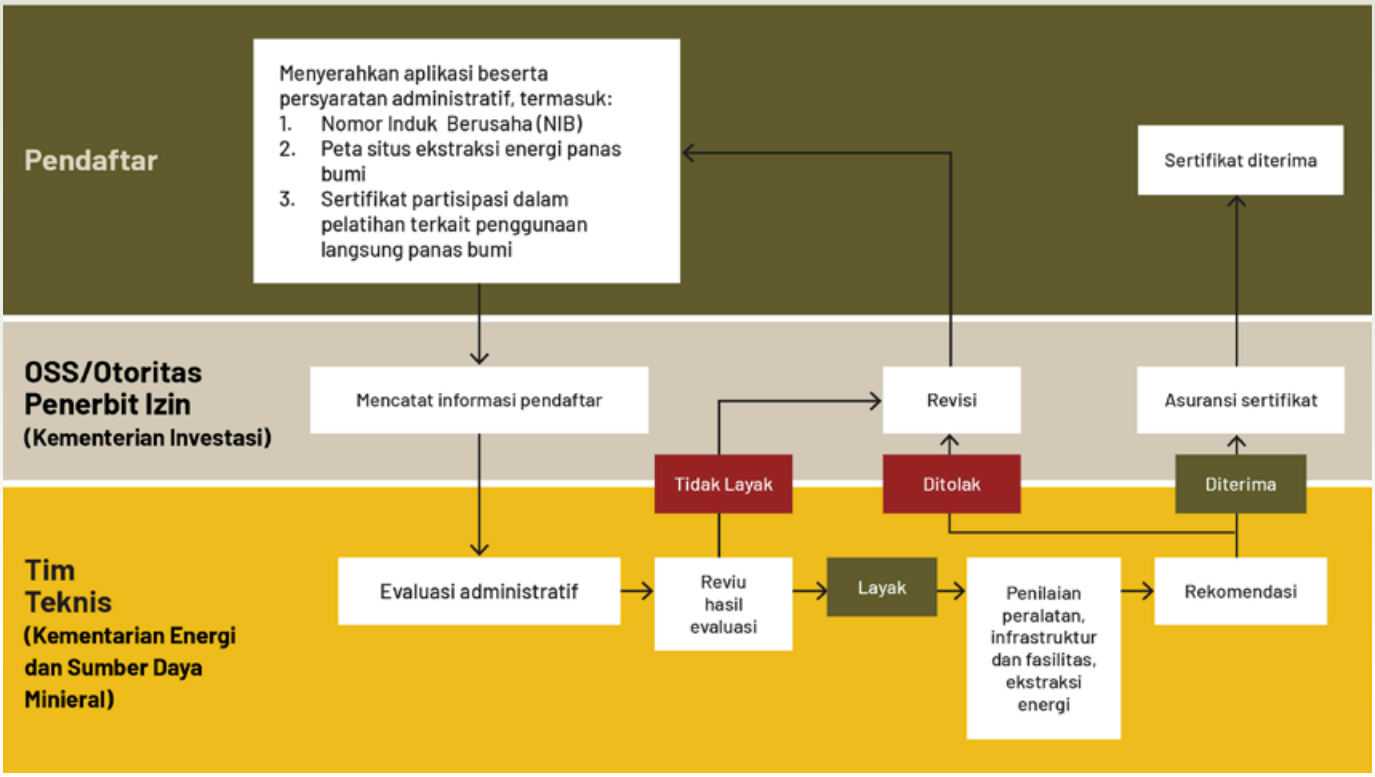
- **Tetapkan jalur cepat untuk sertifikat kelayakan operasional (COW)** dengan tenggat waktu tingkat layanan yang jelas.
- **Klarifikasi peran lembaga** melalui keputusan bersama dan daftar periksa standar.
- **Terapkan sistem persetujuan bertingkat** agar proyek-proyek kecil dan berisiko rendah dapat berjalan dengan cepat.



- **Bangun kapasitas peninjauan regional** dan memberikan panduan kepada pengembang.
- **Integrasikan izin** ke dalam sistem OSS. untuk mengurangi pengajuan yang duplikat.

Perbaikan ini harus diiringi dengan program peningkatan kapasitas yang kuat bagi pemerintah provinsi dan daerah untuk memastikan inspektur dan pekerja lokal memiliki kompetensi teknis untuk menilai, mensertifikasi, dan memantau instalasi penggunaan langsung panas bumi dengan benar.

DIAGRAM PROSES UNTUK MENERBITKAN SERTIFIKAT KELAYAKAN OPERASIONAL UNTUK PENGGUNAAN LANGSUNG PANAS BUMI



Gambar 7.3: Diagram proses yang menguraikan tahapan dan otoritas yang bertanggung jawab yang terlibat dalam penerbitan Sertifikat Kelayakan Operasional untuk instalasi penggunaan langsung panas bumi. OSS = Online Single Submission. Sumber: Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri ESDM Nomor 5 Tahun 2021 tentang standar kegiatan usaha dan produk dalam pelaksanaan perizinan usaha berbasis risiko di sektor energi dan sumber daya mineral*. Pemerintah Indonesia; Al Asy'ari, MR, Adityatama, DW, Brilian, VA, Erichatama, N., & Purba, D. (2024). Beyond electricity: Geothermal direct use business models and potential applications in Indonesia. Dalam *Prosiding, Lokakarya ke-49 tentang Rekayasa Reservoir Panas Bumi*. Stanford, CA, Amerika Serikat..

Rekomendasi 6: Kurangi risiko keuangan dengan data terbuka dan program eksplorasi yang diperluas

Pihak yang Bertindak: Direktorat Jenderal Energi Baru dan Terbarukan serta Badan Konservasi Energi dan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Alam; Kementerian Keuangan; PT Sarana Multi Infrastruktur; Dana Jaminan Infrastruktur Indonesia; Satuan Tugas Khusus Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas

Indonesia sudah memiliki dua mekanisme utama untuk mengurangi risiko keuangan pengembangan panas bumi tahap awal: Skema Pengeboran Pemerintah (Peraturan Menteri Keuangan No. 62/2017)—di mana negara secara langsung mendanai dan melaksanakan pengeboran sebelum melakukan tender wilayah kerja—dan Proyek Mitigasi Risiko Sumber Daya Panas Bumi (GREM, P166071), yang diluncurkan pada tahun 2018 dengan dukungan dari Bank Dunia dan Dana Investasi Iklim. GREM mulai beroperasi pada Juni 2021 dan dikelola oleh PT Sarana Multi Infrastruktur (PT SMI), yang menyediakan pembiayaan kontingensi kepada pengembang swasta dan milik negara untuk pengeboran eksplorasi. Struktur program ini memungkinkan pengampunan sebagian pinjaman jika sumur terbukti tidak layak, yang mengurangi risiko dan mendorong partisipasi swasta.

Hingga saat ini, GREM telah memajukan beberapa prospek—termasuk Toka Tindung (Klabat-Wineru), Wapsalit, dan Hu'u Daha—ke tahap uji tuntas dan pembiayaan, dan nota kesepahaman dengan Ormat Technologies ditandatangani pada September 2025. Namun, belum ada sumur yang didanai GREM yang didokumentasikan secara publik yang telah dibor,[48] yang memperlihatkan tidak hanya potensi dari program tersebut tetapi juga pentingnya untuk mempercepat implementasinya. Dengan memperluas mekanisme ketimbang menciptakan struktur baru yang redundan, Indonesia dapat memanfaatkan modal multilateral, memperkuat peran PT SMI sebagai perantara keuangan, dan mempercepat partisipasi sektor swasta.

Saat ini, informasi panas bumi di Indonesia masih terkotak-kotak—tersebar di berbagai lembaga, institusi penelitian, dan entitas negara dengan standar

TATA KELOLA SEKTOR PANAS BUMI DI EMPAT NEGARA

Aspek	Kenya	Turkiye	Amerika Serikat	Indonesia
Struktur Pasar	Liberalisasi, pembeli tunggal dengan akses terbuka untuk Produsen Tenaga Listrik Independen (IPP)	Liberalisasi produksi, jaringan listrik dikendalikan negara	Campuran: deregulasi dan regulasi oleh negara	Pembeli tunggal (PLN)
Peran sektor publik	Perusahaan Pengembangan Panas Bumi (GDC) mendanai eksplorasi	Direktorat Riset dan Eksplorasi Mineral (MTA) mengambil peran awal, kini dipimpin swasta	Insentif + hibah (federal & negara bagian)	Pengeboran dari pemerintah, KPS terbatas
Peran sektor swasta	Masuk pasca-eksplorasi	Dipimpin swasta via tarif *feed-in*	Dominan, kompetitif	IPP di bawah kontrak PLN
Penggunaan KPS	Build-Own-Operate-Transfer (BOOT), Build-Own-Operate (BOO), Build-Own-Transfer (BOT) lazim digunakan	KPS terbatas, sebagian BOO	Tidak ada KPS formal, pemiayaan swasta + bantuan	KPS institusional, tidak fokus pada panas bumi

Gambar 7.4: Analisis perbandingan perkembangan energi panas bumi di empat negara. KPS = kemitraan publik-swasta. Sumber: Diadaptasi dari Sutama, C. S., Ashat, A., Nur, S., & Alkano, D. (2024). *Comparative analysis of geothermal PPPs: International insights and Indonesia's cases*. dalam *Proceedings, the 10th Indonesia International Geothermal Convention and Exhibition (IIGCE) 2024*. Jakarta, Indonesia.

data dan aturan akses yang berbeda-beda. Ketentuan kerahasiaan dan kepemilikan yang tumpang tindih antara Kementerian ESDM, Satuan Tugas Khusus Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas (SKK Migas), dan universitas semakin mempersulit berbagi informasi dan menjadikan koordinasi sangat penting untuk basis data nasional yang terpadu. Pembentukan tata kelola yang konsisten dan standar interoperabilitas akan memastikan bahwa eksplorasi yang didanai publik berkontribusi pada sistem pengetahuan terbuka dan kumulatif yang bermanfaat bagi investor dan peneliti. (Lihat Bab 5, "Menyiapkan Tenaga Kerja Masa Depan: Peran Tenaga Kerja dan Institusi Sektor Minyak dan Gas Indonesia.")

Kementerian ESDM, melalui Pusat Data dan Informasinya, harus membangun repositori data dan sampel panas bumi terpusat yang terhubung dengan atlas termal nasional. Repositori tersebut harus didukung oleh API modern dan platform digital untuk integrasi data, pemetaan, dan analisis yang lancar, dan harus menyimpan baik kumpulan data digital maupun sampel inti dan fluida fisik yang dapat diakses oleh pemerintah, akademisi, dan industri. Pengembang yang gagal mematuhi persyaratan pelaporan ini harus dinyatakan tidak memenuhi syarat untuk hak eksplorasi di masa mendatang guna memastikan transparansi dan manfaat publik.

Pada saat yang sama, Indonesia harus memperluas model kemitraan publik-swasta (KPS) untuk eksplorasi dan pengembangan awal panas bumi. Dengan pendekatan ini, entitas publik akan membiayai dan melaksanakan pengeboran awal, sementara sumur yang terbukti akan dialihkan kepada pengembang swasta untuk pembangunan di bawah tender yang transparan. Model seperti itu akan menurunkan hambatan masuk, mendistribusikan risiko secara adil, dan mempercepat penilaian sumber daya. Kerangka kerja yang sebanding di Kenya, di mana Perusahaan Pengembangan Panas Bumi memimpin eksplorasi yang didukung pemerintah, dan di Amerika Serikat dengan program Observatorium Frontier untuk Penelitian Eksplorasi Geotermal (FORGE)[49] menunjukkan bagaimana investasi gabungan publik dan swasta dapat dengan cepat meningkatkan kapasitas panas bumi (lihat **Gambar 7.4**).

Pengintegrasian resmi energi panas bumi ke dalam Strategi KPS Nasional Indonesia akan memungkinkan proyek-proyek untuk mengakses dana kesenjangan kelayakan, fasilitas persiapan proyek, dan jaminan kredit melalui PT SMI, Dana Jaminan Infrastruktur Indonesia, dan bank-bank milik negara.

Selain itu, pemerintah dapat mengambil beberapa langkah konkret selanjutnya untuk mengoperasionalkan rekomendasi ini, termasuk hal-hal berikut:

- **Tingkatkan skala dan percepat jendela pendanaan yang dipimpin pengembang dari GREM** untuk membiayai eksplorasi awal dan pekerjaan studi kelayakan.

- **Perluas kelayakan** untuk proyek panas bumi penggunaan langsung dan generasi baru, termasuk panas industri, pendinginan daerah, dan aplikasi pertanian.

- **Wajibkan pelaporan data terstandarisasi,** yang mengharuskan hasil geologi, geofisika, dan geokimia untuk diserahkan dalam format umum dan dirilis secara publik setelah periode kerahasiaan antara tiga dan lima tahun untuk memastikan bahwa pengeboran yang didukung negara memperluas basis pengetahuan panas bumi nasional.

Dengan menggabungkan kebijakan data terbuka dengan perluasan pembagian risiko dan program eksplorasi berbasis KPS, Indonesia dapat beralih dari persiapan proyek yang terisolasi ke pengeboran puluhan sumur setiap tahun pada akhir tahun 2020-an. Hal ini kemudian akan menciptakan jalur eksplorasi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan berkelanjutan di semua jenis energi panas bumi. Reformasi ini akan mengurangi risiko investor, memperluas pengetahuan ilmiah, dan menjadikan Indonesia sebagai pemimpin regional dalam pengembangan panas bumi yang transparan dan inovatif.



KOLABORASI, PROYEK PERCONTOHAN, DAN PENGUMPULAN DATA

Pemerintah dapat membentuk program percontohan bekerja sama dengan universitas-universitas Indonesia, perusahaan milik negara, dan penyedia teknologi global untuk inovasi panas bumi. Inisiatif ini akan berfokus pada penggunaan kembali ladang minyak dan gas yang telah habis atau marginal sebagai tempat uji coba untuk konsep panas bumi generasi baru, termasuk sistem panas bumi yang ditingkatkan dan canggih, desain siklus tertutup, dan eksplorasi batuan superpanas. Dengan membangun di lokasi yang sudah ada sumur, landasan, dan pipa, serta dengan data seismik yang ada, program semacam itu dapat mengurangi biaya dan mempersingkat jangka waktu sekaligus mendemonstrasikan pendekatan baru di bawah kondisi geologi Indonesia.

Program ini dapat disusun berdasarkan hibah kompetitif dan pembiayaan konsesional untuk konsorsium universitas-industri, mendorong kemitraan yang menggabungkan riset akademis, operator lokal, dan perusahaan jasa internasional. Klaster percontohan unggulan untuk menguji pembangkit listrik dan aplikasi penggunaan langsung dapat diluncurkan di wilayah yang memiliki koneksi langsung ke kawasan industri atau pusat data seperti Sumatra, Jawa, dan Kalimantan. Klaster ini juga akan berfungsi sebagai laboratorium lapangan untuk melatih insinyur, mahasiswa, dan regulator Indonesia, membangun tenaga kerja terampil untuk generasi pengembangan panas bumi berikutnya.

Data Pengumpulan dan Berbagi

Semua proyek percontohan harus tunduk pada persyaratan data terbuka, dengan hasil kinerja dan informasi bawah permukaan dipublikasikan dalam jangka waktu tertentu untuk mempercepat replikasi. Insentif fiskal dan pembagian biaya dari industri—yang berpotensi dibiayai melalui pendapatan penetapan harga karbon atau dana inovasi yang ada—akan membantu mengurangi risiko investasi tahap awal sekaligus memperkuat partisipasi sektor swasta jangka panjang. Pada tahun 2028, program tersebut harus bertujuan untuk menghasilkan setidaknya lima sumur percontohan panas bumi canggih, data tekno-ekonomi yang tervalidasi untuk penskalaan, dan sekelompok profesional Indonesia dengan keahlian praktis. Bersama-sama, hasil ini akan menjadikan Indonesia sebagai pemimpin regional dalam mengadaptasi teknologi panas bumi canggih ke lingkungan tropis dan ladang minyak.

Rekomendasi 7: Gunakan Pengadaan Kolektif untuk Menurunkan Biaya Proyek

Pihak yang Bertindak: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral; Kementerian Keuangan; Badan Pengadaan Publik Nasional

Pemerintah dapat mendukung pengembang energi panas bumi dengan melakukan pengadaan kolektif (atau bersama), terutama pada tahap awal eksplorasi ketika biaya dan risikonya signifikan (lihat **Gambar 7.5**). Tindakan ini dapat mengurangi biaya keseluruhan proyek dengan mengamankan harga yang lebih rendah untuk komponen-komponen utama seperti generator, turbin, dan peralatan pengeboran.

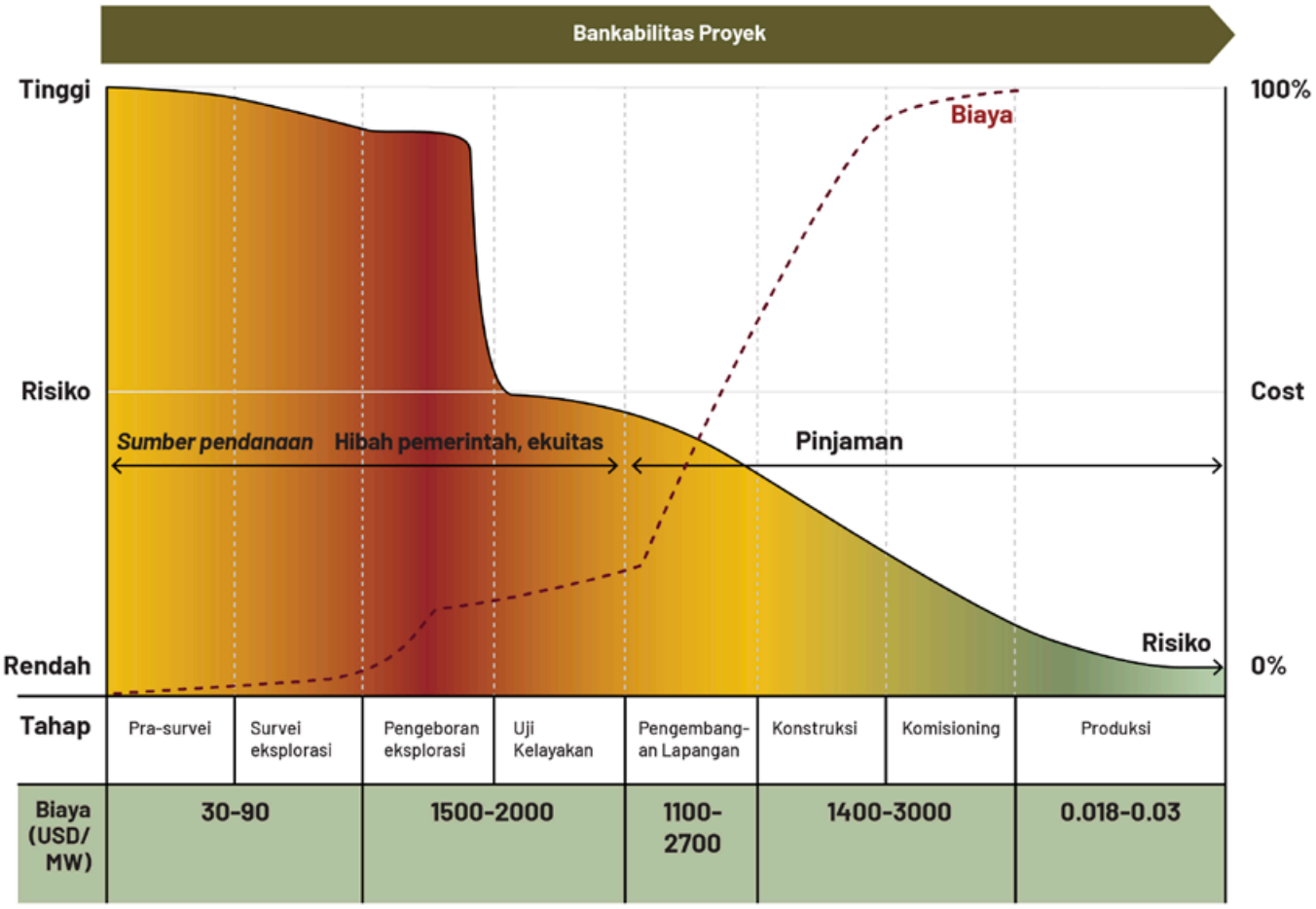
Dukungan semacam itu sangat penting di Indonesia. Sumber daya panas bumi Indonesia sering kali terletak di daerah terpencil dengan infrastruktur terbatas, yang meningkatkan kompleksitas dan biaya proyek panas bumi. Dalam beberapa kasus, pengembang harus membangun infrastruktur mereka sendiri, termasuk jalan dan jembatan, yang dapat menyebabkan biaya pengeboran yang tinggi; saat ini, sumur tipikal dengan kedalaman antara 2.000 meter dan 2.500 meter dapat menelan biaya antara US$4 dan US$6 juta di Indonesia.[50]

Untuk menurunkan biaya dan membuat pasar lebih layak bagi pengembang, pemerintah harus membuat "unit koordinasi pengadaan panas bumi" khusus. Di bawah Kementerian ESDM, unit tersebut akan memfasilitasi tender terpusat untuk layanan pengeboran yang akan digunakan di beberapa WKP di provinsi atau pulau yang sama. Unit tersebut juga dapat membuat basis data pemasok yang telah memenuhi syarat yang mencakup kontraktor dan penyedia layanan lainnya dengan pengalaman yang memadai.

Unit ini juga akan memastikan bahwa prosedur pengadaan selaras dengan persyaratan



RISIKO, BIAYA DAN SUMBER PENDANAAN SELAMA INI UNTUK PROYEK PANAS BUMI



Gambar 7.5: Risiko, biaya, dan sumber pendanaan proyek panas bumi. Sumber: Diadaptasi dari Fridriksson, T., Matek, B., Albertsson, A., & Bertani, R. (2016). *Comparative analysis of approaches to geothermal resource risk mitigation: A global survey*. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), World Bank; Purwanto, E. H. (2019). *Assessment of exploration strategies, results and costs of geothermal fields in Indonesia*. United Nations University Geothermal Training Programme.

peraturan dan praktik terbaik industri. Unit ini dapat menawarkan insentif seperti subsidi atau manfaat pajak untuk inisiatif pengadaan kolektif bersama. Unit ini juga harus menetapkan pedoman yang jelas untuk mencegah praktik anti-persaingan.

Pemerintah daerah memainkan peran penting dalam pengadaan kolektif, dan unit ini akan bertanggung jawab untuk bekerja sama dengan pemerintah dalam hal rute mobilisasi dan perizinan. Selain mengurangi biaya, pendekatan ini juga dapat meminimalkan periode menganggur antar proyek bagi kontraktor.

Rekomendasi 8: Standarisasi kontrak jangka panjang untuk energi panas bumi

Pihak yang Bertindak: Direktorat Jenderal Kelistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral; PLN; Direktorat Jenderal Pembiayaan dan Manajemen Risiko Kementerian Keuangan

Saat ini, bahkan ketika tarif disesuaikan, pengembang tetap enggan untuk menginvestasikan modal karena risiko bahwa pihak lain dalam kontrak akan gagal memenuhi kewajibannya. PLN saat ini merupakan satu-satunya pembeli listrik di Indonesia, dan kondisi

keuangannya telah membatasi kemampuannya untuk menandatangani PPA yang layak secara finansial. Merevisi mekanisme penetapan harga dapat membantu, tetapi tanpa keyakinan bahwa ada pembeli yang aman, investor tetap ragu-ragu.

Untuk mengatasi situasi ini, pemerintah harus mewajibkan agar semua Perjanjian Pembelian Listrik(PPA) panas bumi PLN disusun sebagai kontrak jangka panjang yang layak dibiayai bank, dengan ketentuan terkait pengurangan produksi, penghentian, dan kewajiban pembayaran yang selaras dengan norma internasional. Untuk mengurangi risiko pihak lawan, PPA untuk proyek panas bumi dengan pengeluaran modal tinggi harus didukung oleh jaminan pemerintah. Jaminan ini akan secara signifikan mengurangi biaya pembiayaan, meningkatkan peringkat kredit proyek, dan membuka skala investasi yang dibutuhkan untuk potensi panas bumi Indonesia.

Rekomendasi 9: Tingkatkan partisipasi masyarakat dan jamin manfaat bagi masyarakat dengan mereformasi bonus produksi panas bumi

Pihak yang Bertindak: Direktorat Jenderal Perbendaharaan Kementerian Keuangan, Direktorat Jenderal Pembiayaan dan Manajemen Risiko, dan Badan Kebijakan Fiskal; Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral; Kementerian Dalam Negeri

Indonesia sudah membagikan sebagian besar pendapatan panas bumi dengan daerah-daerah setempat—80% dari Dana Bagi Hasil (DBH) mengalir ke pemerintah daerah dan 20% ke pemerintah pusat.[51] Meskipun pembagian ini mendukung desentralisasi, hal ini masih kurang transparan dan tidak memberikan hasil nyata di tingkat lokal. Setelah ditransfer, pendapatan sering kali tertelan ke dalam anggaran umum, sehingga masyarakat memiliki infrastruktur yang terlihat tetapi tidak ada dividen fiskal yang jelas—yang memicu ketidakpercayaan dan penolakan. (Lihat Bab 6, "Mencari Titik Temu: Membangun Kepercayaan dan Transparansi dalam Transisi Energi Indonesia," untuk konteks lebih lanjut.) Persepsi ini semakin meningkat di daerah-daerah seperti Wapsalit,[52] Gunung Talang,[53] Tampomas,[54] dan Tangkuban Perahu,[55] di mana konsultasi yang buruk, pembagian keuntungan yang lemah, dan kekhawatiran lingkungan telah memicu penentangan dan penundaan proyek.[56]

Untuk membangun kembali kepercayaan, Indonesia harus mengkonsolidasikan pendapatan panas bumi melalui mekanisme bonus produksi panas bumi (BPPB) yang terpadu—sebuah instrumen dalam sistem Pendapatan Negara Bukan Pajak (PNBP)—dengan menyatukan DBH, PNBP, dan kontribusi sukarela dari pengembang. Dikelola bersama oleh Kementerian Keuangan dan ESDM, mekanisme BPPB yang ditingkatkan ini akan berfungsi sebagai wahana utama untuk memberikan manfaat lokal. Mekanisme ini harus membiayai hasil nyata seperti sekolah, klinik, pusat pelatihan, jaringan pendingin panas bumi, dan proyek percontohan panas industri—memastikan masyarakat melihat dan merasakan manfaat dari keberadaan proyek panas bumi. Akses terhadap manfaat yang didukung BPPB harus bergantung pada kepatuhan yang terverifikasi terhadap komitmen tanggung jawab sosial perusahaan (CSR); protokol persetujuan bebas, sebelumnya, dan berdasarkan informasi (FPIC); dan Sertifikat Kelayakan Operasional. Semua operasi harus dipublikasikan pada dasbor publik yang dikelola oleh ESDM dan Bappenas dan menunjukkan arus pendapatan yang diaudit dan proyek yang disetujui.

Pendekatan ini dapat dibangun berdasarkan kepemimpinan lokal. Peraturan Daerah Provinsi Lampung Nomor 11/2019[57] tentang penggunaan air permukaan (diuraikan dalam Rekomendasi 1) menawarkan preseden yang kuat—menciptakan sistem yang transparan dan berbasis komunitas untuk mengelola sumber daya alam. Model panas bumi yang serupa dapat menetapkan kerangka kerja perizinan, biaya penggunaan, dan alokasi pendapatan di tingkat provinsi, kemudian diperluas ke tingkat nasional.

Untuk memperkuat implementasi, Kementerian ESDM dan Kementerian Dalam Negeri harus mengubah CSR dari praktik sukarela menjadi kewajiban yang harus dapat diverifikasi. Indikator seperti penciptaan lapangan kerja lokal, pengadaan barang dan jasa oleh masyarakat, dan penyediaan aset sosial harus diverifikasi secara independen dan diungkapkan kepada publik. Pengembang yang gagal memenuhi kewajiban harus menghadapi sanksi yang dapat ditegakkan.



Suatu badan tata kelola panas bumi independen perlu dibentuk untuk mengawasi pengumpulan, alokasi, dan pengeluaran pendapatan BPPB, yang dapat memastikan formula transparan untuk mendistribusikan royalti dan PNBP di antara pemangku kepentingan nasional, regional, dan lokal. Fungsi tata kelola ini dapat dikelola melalui PT SMI—lembaga perantara keuangan milik negara yang terpercaya—untuk memberikan integritas fidusia dan akuntabilitas. Badan ini juga harus mendukung proyek percontohan untuk pendinginan panas bumi dan panas industri, serta mengalokasikan sebagian pendapatan untuk manufaktur peralatan dalam negeri—membantu Indonesia membangun rantai pasokan nasional yang kuat.

Kemudian yang tidak kalah penting, proyek panas bumi harus menghormati hak-hak masyarakat adat. Kementerian ESDM harus menjadikan PADIATAPA (Persetujuan Atas Dasar Informasi di Awal Tanpa Paksaan) sebagai persyaratan prosedural untuk pembangunan yang memengaruhi lahan adat, sementara pengembang harus bekerja sama dengan universitas lokal dan lembaga lingkungan untuk bersama-sama menghasilkan tolok ukur sosial, memantau dampak lingkungan dan sosial, dan mempertahankan sistem pengaduan yang mudah diakses dengan jalur menuju mediasi. Pemerintah daerah harus memimpin perencanaan partisipatif, menunjuk perwakilan masyarakat untuk bertugas di panel penasihat yang memandu investasi dan pencairan dana yang didukung BPPB.

Terakhir, konten lokal harus meluas melampaui pengadaan barang hingga ke masyarakat. Pusat pendidikan dan pelatihan di wilayah panas bumi harus membekali penduduk setempat dengan keterampilan dalam konstruksi, operasi, dan keselamatan—sehingga memungkinkan lapangan kerja jangka panjang dan integrasi komunitas yang lebih dalam.

Reformasi ini sejalan dengan arsitektur hukum Indonesia: secara bersamaan, UU No. 33/2004 tentang keseimbangan fiskal[58] dan UU No. 21/2014 tentang energi panas bumi memberikan kewenangan untuk koordinasi fiskal dan sektoral. Pembangunan juga harus mematuhi

PRIORITASKAN PEMBANGUNAN DI ZONA BERISIKO RENDAH

Di pulau Sumatra, Jawa, Sulawesi, dan Maluku, potensi panas bumi Indonesia yang signifikan sering kali tumpang tindih dengan area yang sensitif secara ekologis.[60] Untuk meminimalkan dampak lingkungan dan keanekaragaman hayati, pemerintah harus memprioritaskan pembangunan di zona non-hutan, yang mengandung sekitar 38% dari kapasitas panas bumi konvensional nasional. Area-area ini biasanya menawarkan akses jalan yang lebih mudah, geologi yang menguntungkan, dan biaya investasi yang lebih rendah, sehingga memungkinkan pembangunan yang lebih cepat dan tidak terlalu mengganggu.

Proyek panas bumi di kawasan hutan—yang sering kali terpencil dan bergunung-gunung—dapat memerlukan pembangunan jalan hingga 10 kilometer per 100 megawatt kapasitas,[61] sehingga meningkatkan risiko kerusakan lingkungan terhadap hutan, satwa liar, dan sumber air. Pengembang sebaiknya menghindari lokasi seperti itu jika memungkinkan. Jika pembangunan di kawasan hutan diperlukan, Kementerian ESDM dan Kementerian Kehutanan harus menerapkan pengamanan yang ketat: mendorong pengeboran terarah dari luar batas hutan, meminimalkan pembukaan lahan, membatasi ukuran jalan, dan mengintegrasikan penyeberangan fauna dan pengendalian erosi. Pengembang juga harus diwajibkan untuk melatih personel tentang perlindungan keanekaragaman hayati dan kepatuhan terhadap peraturan.

Pada akhirnya, Indonesia harus memastikan pengembangan panas bumi tidak meningkatkan tekanan pada ekosistem hutan. Memperluas definisi hukum panas bumi untuk mencakup aplikasi berdampak rendah—seperti penggunaan langsung untuk pendinginan dan panas industri—dapat menggeser pengembangan ke zona yang kurang sensitif dan bukan hutan. Pendekatan ini menyelaraskan pengelolaan lingkungan dengan tujuan energi, memungkinkan pertumbuhan berkelanjutan tanpa mengorbankan keanekaragaman hayati.



UU Lingkungan Hidup No. 32/2009[59] dan peraturan pelaksana Kementerian Lingkungan Hidup tentang Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL) dan restorasi pasca operasi.

Mekanisme BPPB yang direformasi dan dikonsolidasikan dengan kontribusi DBH, PNBP, dan pengembang dapat menyatukan kewajiban yang tersebar menjadi satu sistem yang transparan—menghubungkan setiap rupiah dengan hasil nyata dan menunjukkan bagaimana kekayaan panas bumi Indonesia dapat mendorong model kedaulatan hijau yang mengangkat masyarakat setempat.

Rekomendasi 10: Perluas ekosistem panas bumi untuk membuka lapangan kerja lokal

Pihak yang Bertindak: Kementerian Tenaga Kerja; Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi; Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Kementerian Tenaga Kerja dan Riset; Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Beberapa wilayah di Indonesia menolak pengembangan energi panas bumi. Sebagian, penolakan ini mungkin disebabkan oleh kurangnya informasi tentang manfaat sumber energi tersebut bagi masyarakat. Meningkatkan kesadaran masyarakat tentang manfaat ekonomi dan iklim dari energi panas bumi dapat mendorong penerimaan sosial dan dukungan publik. Untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan tersebut, pemerintah harus memulai program pendidikan tentang energi panas bumi bagi pekerja energi dan masyarakat umum sebagai bagian dari kebijakan energi nasional yang lebih luas.

Tindakan ini dapat mencakup pembentukan dana khusus untuk program pelatihan, mempromosikan penelitian dan inovasi terkait panas bumi, dan memasukkan energi panas bumi dan topik pemanfaatan langsung ke dalam kurikulum sekolah. Upaya pendidikan ini juga dapat diselaraskan dengan target energi nasional.

Melalui Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia, Kementerian ESDM hendaknya berkolaborasi dengan universitas-universitas dalam kegiatan pendidikan seperti Geothermal Goes to Campus, sebuah inisiatif yang telah dilaksanakan di beberapa universitas di Indonesia, termasuk Institut Teknologi Sepuluh Nopember,[62] Universitas Diponegoro,[63] dan Universitas Sumatera Utara.[64] Kegiatan-kegiatan seperti ini dapat menumbuhkan minat mahasiswa dalam mengeksplorasi pengembangan energi panas bumi di Indonesia.

Untuk menjangkau khalayak yang lebih luas, Kementerian ESDM sebaiknya berkolaborasi dengan organisasi nonpemerintah atau universitas untuk memberikan webinar gratis tentang topik panas bumi. Beberapa organisasi telah memberikan webinar tentang panas bumi dengan berbagai topik, termasuk Pusat Studi Energi Terbarukan Indonesia; Institute for Essential Services Reform (IESR) telah menyelenggarakan webinar tentang manfaat sosial dan ekonomi energi panas bumi.[65]

Menurut *Peta Jalan Tenaga Kerja Khusus untuk Transisi Indonesia (SWIFT) 2025–2060*, kebutuhan tenaga kerja di sektor panas bumi akan meningkat sebanyak 130.000 pekerja pada tahun 2060,[66] tetapi jika negara berupaya menghasilkan 25 gigawatt listrik dan 35 gigawatt termal, kebutuhan tenaga kerja langsung dan tidak langsung dapat mencapai lebih dari 650.000 pada tahun 2045.

Penting untuk menyoroti perbedaan antara menambahkan aplikasi penggunaan langsung dan aplikasi panas termal ke dalam persamaan ini. Setelah pembangkit energi panas bumi konvensional beroperasi, jumlah pekerjaan di lokasi yang dibutuhkan relatif terbatas, itulah sebabnya lulusan bidang panas bumi secara historis menghadapi tantangan dalam mendapatkan pekerjaan jangka panjang di sektor ini. Namun, peluang komersial yang muncul—seperti aplikasi penggunaan langsung, jaringan pendingin panas bumi, ekstraksi mineral panas bumi, dan produksi hidrogen hijau—dapat menghasilkan permintaan tenaga kerja yang jauh lebih besar dan menciptakan rantai nilai baru yang mendiversifikasi lapangan kerja terkait panas bumi. Jika Indonesia berhasil memanfaatkan peluang berbasis panas bumi yang lebih luas ini, kebutuhan tenaga kerja dapat meningkat secara signifikan di seluruh layanan pengeboran, jaringan panas industri, pendinginan distrik, pemulihan mineral, dan produksi hidrogen—sehingga upaya peningkatan kapasitas menjadi lebih relevan dan berdampak.



Sebagaimana dijelaskan dalam Bab 5, "Menyiapkan Tenaga Kerja Masa Depan: Peran Tenaga Kerja dan Institusi Sektor Minyak dan Gas Indonesia," pemerintah perlu mengembangkan peta pekerjaan yang komprehensif untuk membantu lembaga-lembaga bersiap mempersiapkan tenaga kerja panas bumi yang terampil. Peta ini akan mengidentifikasi keterampilan saat ini, distribusi tenaga kerja, dan kebutuhan pasar tenaga kerja di masa depan. Peta ini juga akan mengidentifikasi kapasitas dan kesenjangan yang ada sehingga pemerintah dapat merencanakan kebijakan dan program pelatihan yang relevan.

Untuk mengkoordinasikan agenda tenaga kerja ini, pemerintah harus membentuk Gugus Tugas Transisi Tenaga Kerja Energi yang disahkan oleh instruksi presiden dan dipimpin oleh Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia Kementerian ESDM. Gugus tugas ini akan menyelaraskan perkiraan, pelatihan, dan sertifikasi di seluruh kementerian, memastikan keterampilan panas bumi dan transisi energi berkembang dalam jalur terpadu yang siap untuk industri. Lihat Bab 5, "Menyiapkan Tenaga Kerja Masa Depan: Peran Tenaga Kerja dan Institusi Sektor Minyak dan Gas Indonesia," untuk informasi lebih lanjut.

Peta pekerjaan yang mapan dapat memandu inisiatif kebijakan, termasuk pelatihan kejuruan, pengembangan kurikulum, dan program sertifikasi. Hal ini juga akan mendorong hubungan yang kuat antara lembaga pendidikan, permintaan industri, dan rencana pembangunan pemerintah. Peta tersebut juga harus melibatkan industri minyak dan gas karena terdapat banyak keterampilan dan kompetensi tenaga kerja yang dapat diterapkan di kedua industri energi tersebut—hingga 80% dari upaya tenaga kerja yang dibutuhkan dalam industri panas bumi melibatkan keterampilan yang umum di industri minyak dan gas.[67] (Untuk informasi lebih lanjut tentang topik ini, lihat Bab 5, "Menerapkan Tenaga Kerja Masa Depan: Peran Tenaga Kerja dan Institusi Sektor Minyak dan Gas Indonesia.")

KESIMPULAN

Jika Indonesia mampu memanfaatkan sebagian kecil saja dari potensi panas buminya, hal itu akan memperkuat ketahanan jaringan listrik nasional, menurunkan permintaan puncak, mengurangi impor bahan bakar, mempertajam daya saing industri, dan memperluas akses pendinginan yang terjangkau. Dengan menerapkan rekomendasi yang ditawarkan dalam bab ini, Indonesia dapat berada di jalur yang tepat untuk mencapai target iklimnya sekaligus menurunkan biaya energi jangka panjang dan menciptakan ratusan ribu lapangan kerja.

Langkah pertama yang perlu dilakukan: memperbarui undang-undang geotermal untuk secara jelas membahas geotermal generasi baru dan penggunaan langsung, seperti yang diuraikan dalam rekomendasi kebijakan pertama di bab ini.

Berlandaskan pada kekuatan geologis dan kapasitas negara Indonesia—dan berdasarkan praktik terbaik global—serangkaian rekomendasi yang ditawarkan dalam bab ini dapat memperkuat posisi Indonesia sebagai pemimpin global dalam energi panas bumi.



REFERENSI

1 ANTARA News. (2025, April 14). *Govt aims to increase installed geothermal capacity by 5.2 GW*. https://en.antaranews.com/news/351665/govt-aims-to-increase-installed-geothermal-capacity-by-52-gw

2 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2014). *Undang-Undang Nomor 21 Tahun 2014 tentang Energi Panas Bumi*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/38684/uu-no-21-tahun-2014. Lihat Pasal 5 (1)(a).

3 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, 2014, Pasal 9 (1).

4 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, 2014, Pasal 5 (1)(b).

5 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, 2014, Pasal 6, 7, 8.

6 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, 2014, Pasal 23.

7 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri ESDM Nomor 5 Tahun 2021 tentang standar kegiatan usaha dan produk dalam pelaksanaan perizinan usaha berbasis risiko di sektor energi dan sumber daya mineral*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/175252/permen-esdm-no-5-tahun-2021

8 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 23 Tahun 2021 tentang pengelolaan hutan*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/161853/pp-no-23-tahun-2021. Lihat Pasal 95 (2).

9 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2017). *Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 7 Tahun 2017 tentang Energi Panas Bumi untuk Pemanfaatan Tidak Langsung*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/5827/pp-no-7-tahun-2017

10 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2018). *Peraturan Menteri ESDM Nomor 37 Tahun 2018 tentang penawaran Wilayah Kerja Panas Bumi, pemberian izin panas bumi, dan pengalihan usaha panas bumi*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/142928/permen-esdm-no-37-tahun-2018

11 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, 2014, Pasal 15.

12 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, *Peraturan Menteri ESDM Nomor 5 Tahun 2021 tentang standar kegiatan usaha dan produk dalam pelaksanaan perizinan usaha berbasis risiko di sektor energi dan sumber daya mineral*, 2021.

13 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2020). *Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2020 tentang Penciptaan Lapangan Kerja*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/149750/uu-no-11-tahun-2020

14 Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi. (2025, 2 Juli). *Konsultasi publik mengenai rancangan amandemen peraturan pemerintah nomor 7 tahun 2017* [Video]. YouTube. Pemerintah Indonesia. https://www.youtube.com/watch?v=nA-8IMX3kP8&t=8418s

15 Soerono, D. (2017, December 4). *Risk mitigation and the restructuring of geothermal funds in Indonesia*. ThinkGeoEnergy. https://www.thinkgeoenergy.com/risk-mitigation-and-the-restructuring-of-geothermal-funds-in-indonesia/

16 Surana, T., Atmojo, JP, Suyanto, & Subandriya, A. (2010). Perkembangan pemanfaatan langsung energi panas bumi di Indonesia. *Buletin Kuartalan Geo-Heat Center, 29* (2), 11–15. https://www.researchgate.net/publication/364318954_Development_of_Geothermal_Energy_Direct_Use_in_Indonesia

17 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2003). *Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2003 tentang Energi Panas Bumi*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/44080/uu-no-27-tahun-2003. Lihat Pasal 10 (6).

18 Nugraha, HS (2025, 30 Juli). *Pedoman untuk pemanfaatan panas bumi langsung*. Berita Badan Geologi. https://geologi.esdm.go.id/media-center/guidelines-for-direct-geothermal-utilization

19 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, 2014, Pasal 9 (2).

20 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, 2014, Pasal 10.

21 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, *Peraturan Menteri ESDM Nomor 5 Tahun 2021 tentang standar kegiatan usaha dan produk dalam pelaksanaan perizinan usaha berbasis risiko di sektor energi dan sumber daya mineral*, 2021; lihat Pasal 18 (1).

22 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, *Peraturan Menteri ESDM Nomor 5 Tahun 2021 tentang standar kegiatan usaha dan produk dalam pelaksanaan perizinan usaha berbasis risiko di sektor energi dan sumber daya mineral*, 2021; lihat Lampiran IV.

23 Nugraha, 2025.

24 Kantor Asisten Wakil Sekretaris Kabinet Bidang Dokumen Negara & Penerjemahan. (2017, 11 Januari). *Gov't issues Presidential Regulation No. 122/2016 on more priority infrastructures*. Cabinet Secretariat of the Republic of Indonesia. https://setkab.go.id/en/govt-issues-presidential-regulation-no-1222016-on-more-priority-infrastructures/

25 Richter, A. (2020, October 23). *Geothermal support mechanism and FIT officially extended in Turkey*. ThinkGeoEnergy. https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal-support-mechanism-and-fit-officially-extended-in-turkey/

26 Paris, France. (2024, May 7). *Everything you need to know about connecting to the urban heating network*. https://www.paris.fr/pages/le-raccordement-au-reseau-de-chaleur-dans-le-cadre-du-classement-22187

27 LowTEMP Project. (2021). *Contracting and pricing of heat supply agreements (HSA)*. https://www.lowtemp.eu/wp-content/uploads/2021/06/Handout_Contracting-and-Pricing-of-HSA-LowTEMP.pdf



28 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2019). *Peraturan Gubernur Provinsi Lampung Nomor 11 Tahun 2019 tentang pedoman pelaksanaan pengumpulan dan prosedur perhitungan pajak air permukaan di Provinsi Lampung*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/115409/pergub-prov-lampung-no-11-tahun-2019

29 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 25 Tahun 2021 tentang Pelaksanaan Sektor Energi dan Sumber Daya Mineral*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/161855/pp-no-25-tahun-2021. Lihat Pasal 18 (1).

30 Dobson, P. F., Pratama, A. R., & Hamilton, B. (2025). *Technical geothermal roadmap for Indonesia*. Lawrence Berkeley National Laboratory. https://doi.org/10.2172/2504632

31 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, 2014.

32 Fakultas Teknik, Pusat Studi Sumber Daya Geologi Non-Konvensional. (tanpa tanggal). *Air garam panas bumi: Sumber daya alam Indonesia yang berpotensi menjadi sumber alternatif litium*. Universitas Gadjah Mada. https://ugrg.ft.ugm.ac.id/artikel/ekstraksi-litium-dari-geothermal-brine/

33 Akmal, AA, Purnomo, CW, & Ariyanto, T. (2023). Adsorpsi natrium pada hasil ekstraksi silika dari lumpur panas bumi. Dalam Prosiding, *Seminar Nasional Teknik Kimia 2023*. https://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/kejuangan/article/view/10310

34 Felia, S. (2025, June 2). *UGM geothermal innovation supports bountiful harvest in Minahasa*. Universitas Gadjah Mada. https://ugm.ac.id/en/news/ugm-geothermal-innovation-supports-bountiful-harvest-in-minahasa/

35 Indrawan, R. (2021, 24 Mei). *Indonesia butuh 758.000 ton litium untuk menunjang kebijakan kendaraan listrik*. Dunia Energi. https://www.dunia-energi.com/indonesia-butuh-758-ribu-ton-lithium-untuk-menunjang-kebijakan-kendaraan-listrik/

36 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *Peraturan Menteri ESDM Nomor 10 Tahun 2025 tentang peta jalan transisi energi di sektor kelistrikan*. Pemerintah Indonesia. https://jdih.esdm.go.id/dokumen/view?id=2567

37 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia. (2022). *Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 112 Tahun 2022 tentang percepatan pengembangan energi terbarukan untuk pasokan listrik*. Pemerintah Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/225308/perpres-no-112-tahun-2022



38 King, B., Ricks, W., Pastorek, N., & Larsen, J. (2025). *Potensi energi panas bumi untuk memenuhi permintaan listrik pusat data yang terus meningkat. Rhodium Group*. https://rhg.com/research/geothermal-data-center-electricity-demand/

39 Valqa, A. (2024, 11 September). *Permintaan listrik pusat data akan mencapai 12 gigawatt pada tahun 2033*. D'Expert. https://www.dexpert.co.id/kebutuhan-listrik-data-center-di-2033-tembus-12-gigawatt

40 Proyek InnerSpace. (2025). *Peta Tingkat Kesukaan Pusat Data Global Saat Ini pada Ketinggian 5000 m* [Modul Pusat Data]. GeoMap. https://geomap.projectinnerspace.org/geomap/

41 Badan Energi Internasional (IEA). (2022). *Peta jalan sektor energi menuju emisi nol bersih di Indonesia: Ringkasan eksekutif*. https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-net-zero-emissions-in-indonesia/executive-summary

42 United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UNESCAP) & United Nations Environment Programme (UNEP). (2024, 6 Agustus). *Indonesia sets path for climate-friendly cooling with National Cooling Action Plan (I-NCAP)*. https://www.unescap.org/news/indonesia-sets-path-climate-friendly-cooling-national-cooling-action-plan

43 UNESCO & UNEP, 2024.

44 GoLaw ID. (nd). *KBLI 06202–Usaha energi panas bumi*. https://golaw.id/en/kbli/06202-pengusahaan-tenaga-panas-bumi/

45 ID Hukum GoLaw. (nd). *KBLI 35111–Pembangkit listrik*. https://golaw.id/en/kbli/35111-pembangkitan-tenaga-listrik

46 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, *Peraturan Menteri ESDM Nomor 5 Tahun 2021 tentang standar kegiatan usaha dan produk dalam pelaksanaan perizinan usaha berbasis risiko di sektor energi dan sumber daya mineral*, 2021; lihat Lampiran IV.

47 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, *Peraturan Menteri ESDM Nomor 5 Tahun 2020 tentang standar kegiatan usaha dan produk dalam pelaksanaan perizinan usaha berbasis risiko di sektor energi dan sumber daya mineral*, 2021.

48 Sutama, CS, Ashat, A., Nur, S., & Alkano, D. (2024). Analisis komparatif KPS panas bumi: Wawasan internasional dan studi kasus Indonesia. Dalam *Prosiding, Konvensi dan Pameran Panas Bumi Internasional Indonesia ke-10 (IIGCE) 2024*. Jakarta, Indonesia. https://www.researchgate.net/publication/386580694_Comparative_Analysis_of_Geothermal_KPSs_International_Insights_and_Indonesia's_Cases

49 Geothermal Technologies Office. (n.d.). *Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE)*. U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/eere/geothermal/forge

50 Dwi, A. (2025, 9 Juli). *CEO Geo Dipa blakblakan soal biaya pengeboran sumur panas bumi, hampir 100 miliar rupiah*. Listrik Indonesia. https://listrikindonesia.com/detail/17192/bos-geo-dipa-blakblakan-biaya-pengeboran-sumur-panas-bumi-hampir-capai-100-miliar

51 Japan International Cooperation Agency (JICA). (2025). *Study on fiscal and non-fiscal incentives to accelerate private sector geothermal energy development in the Republic of Indonesia: Final report*. https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12008710.pdf

52 Lating, M. Q., Mustamu, J., & Holle, E. S. (2025). Legal Protection for Indigenous Peoples in the Granting of Preliminary Survey and Exploration (PSPE) Assignments for Geothermal Energy. *Jurnal Pattimura Law Study Review, 3*(1), 1–9.

53 Mongabay. (2017, 30 September). *Ketika warga Solok memprotes pembangunan pembangkit listrik panas bumi, mengapa?* https://mongabay.co.id/2017/09/30/ketika-warga-di-solok-protes-pembagunan-pembangkit-panas-bumi-mengapa/

54 Sutisna, N. (2021, 3 Mei). *Penentangan terhadap eksplorasi panas bumi Gunung Tampomas terus disuarakan*. Kabar-Priangan. https://kabarpriangan.pikiran-rakyat.com/kabar-priangan/pr-1481863128/penolakan-eksplorasi-panas-bumi-gunung-tampomas-terus-disuarakan?page=all

55 Fadhillah, FR, Al Asy'ari, MR, Bagaskara, A., Vie Vanda, DV, Adityatama, A., Purba, D., Katmoyo, R., Djandam, A., & Gurning, L. (2023). Tantangan dalam Mendapatkan Penerimaan Publik terhadap Proyek Panas Bumi di Indonesia. Dalam *Prosiding, Lokakarya ke-48 tentang Rekayasa Reservoir Panas Bumi*. Stanford, CA, Amerika Serikat. https://www.researchgate.net/publication/369201771_Challenges_in_Getting_Public_Acceptance_on_Geothermal_Project_in_Indonesia

56 Adityatama, DW, Purba, D., & Kristianto, B. (2018). Fasilitas pemanfaatan langsung panas bumi terintegrasi sebagai pendekatan alternatif dalam keterlibatan masyarakat pada fase eksplorasi awal di Indonesia. Dalam *Prosiding, Lokakarya Panas Bumi Internasional ITB ke-7*. Bandung, Indonesia. https://www.researchgate.net/publication/324017987_Integrated_Geothermal_Direct_Use_Facility_as_an_Alternative_Approach_in_Community_Engagement_at_Early_Exploration_Phase_in_Indonesia

57 Badan Pemeriksa Keuangan Indonesia, 2019.

58 Republik Indonesia. (2004). *Undang-Undang No. 33 Tahun 2004 tentang keseimbangan fiskal antara pemerintah pusat dan pemerintah daerah*. https://peraturan.bpk.go.id/Download/30506/UU%20Nomor%2033%20Tahun%202004.pdf

59 Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup*. https://peraturan.bpk.go.id/Download/28100/UU%20Nomor%2032%20Tahun%202009.pdf

60 Meijaard, E., Dennis, R. A., Saputra, B. K., Draugelis, G. J., Qadir, M. C. A., & Garnier, S. (2019). *Rapid environmental and social assessment of geothermal power development in conservation forest areas of Indonesia*. PROFOR & World Bank. https://www.profor.info/sites/default/files/PROFOR_Geothermal%2520Indonesia%2520Report%2520-%2520August%25202019_0.pdf

61 Meijaard dkk., 2019.

62 Institut Teknologi Sepuluh Nopember. (2022). *Energi Panas Bumi Masuk Kampus 2022: Transfer Pengetahuan*. https://www.its.ac.id/tgeofisika/geothermal-goes-to-campus-2022-transfer-knowledge/

63 Universitas Diponegoro. (2022, 27 September). *Panas bumi hadir di kampus dengan topik eksplorasi panas bumi dan penilaian sumber daya*. https://geologi.ft.undip.ac.id/en/geothermal-goes-to-campus-undip-2/

64 Universitas Sumatera Utara. (2023, 11 April). *Energi panas bumi hadir di kampus: Kolaborasi antara USU dan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*. https://www.usu.ac.id/id/berita/geotermal-goes-to-campus-kolaborasi-usu-kementerian-esdm

65 Pusat Studi Energi Terbarukan Indonesia. (2025, 1 Agustus). *Seri Webinar #3: Mengenal Energi Panas Bumi Indonesia: Potensi, Peluang, dan Masa Depan Bersama*. https://icres.or.id/pemandangan/webinar-series-3-manfaat-dan-peluang-panas-bumi-untuk-masyarakat-ekonomi-sosial-dan-lingkungan/

66 Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *Peta jalan Tenaga Kerja Khusus untuk Transisi Indonesia (SWIFT) 2025–2060*. Pemerintah Indonesia. https://www.energytransitionpartnership.org/wp-content/uploads/2025/08/SWIFT_National-roadmap_v5_EN_clean_removed.pdf

67 Badan Energi Internasional (IEA). (2024). *Masa depan energi panas bumi*. https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy



Bap 8

Menciptakan Panas Bumi Hijau: Menjaga Alam dan Masyarakat Melalui Panas Bumi Generasi Baru

Aisah Taufik Hidayat Abdullah dan Shahnaz Nur Firdausi
Institute for Essential Services Reform (IESR)

Energi panas bumi menggabungkan emisi gas rumah kaca yang rendah sepanjang siklus hidup, keandalan pasokan energi 24 jam, dan jejak permukaan terkecil dibandingkan sumber energi terbarukan atau fosil lainnya. Energi panas bumi juga menyediakan energi termal berkualitas tinggi secara langsung ke pabrik atau bangunan, sehingga ideal untuk digunakan dalam pemanasan proses industri, pendinginan dan pemanasan Kawasan urban, serta pompa panas sumber tanah (ground source heat pumps / geothermal heat pumps) —sehingga menghindari kerugian saat energi diubah menjadi listrik dan mengurangi beban puncak jaringan listrik.

Ketika energi panas bumi digunakan sebagai pengganti batu bara, diesel, atau bahan bakar minyak, perbaikan kualitas udara terjadi secara instan: tingkat nitrogen oksida, sulfur dioksida, partikel halus, dan karbon dioksida menurun secara signifikan, sehingga meningkatkan kesehatan masyarakat di kawasan perkotaan dan industri. Desain energi panas bumi modern seperti sistem loop tertutup (advanced geothermal system, atau AGS) dan program reinjeksi (engineered geothermal system, atau EGS) menerapkan sirkulasi air — tidak mengonsumsinya— sehingga mengurangi tekanan air. Selain itu, sirkulasi larutan garam dan gas non-kondensasi dijaga, dan sumur, koridor pipa, serta pabrik dapat dibangun di lahan bekas industri atau dalam kawasan industri yang sudah ada, sehingga mengurangi gangguan terhadap area dan habitat alam.

Bagi Indonesia, profil panas bumi sebagai sumber energi multifungsi memberikan dampak kuat. Seperti yang dijelaskan secara rinci dalam Bab 4, "Melampaui Listrik: Potensi Permintaan Energi Termal Indonesia dan Potensi Pemanfaatan Langsung Panas Bumi," pengetahuan teknis yang sama yang memungkinkan pembangkit listrik panas bumi konvensional terkemuka di dunia juga dapat digunakan untuk membangun sistem

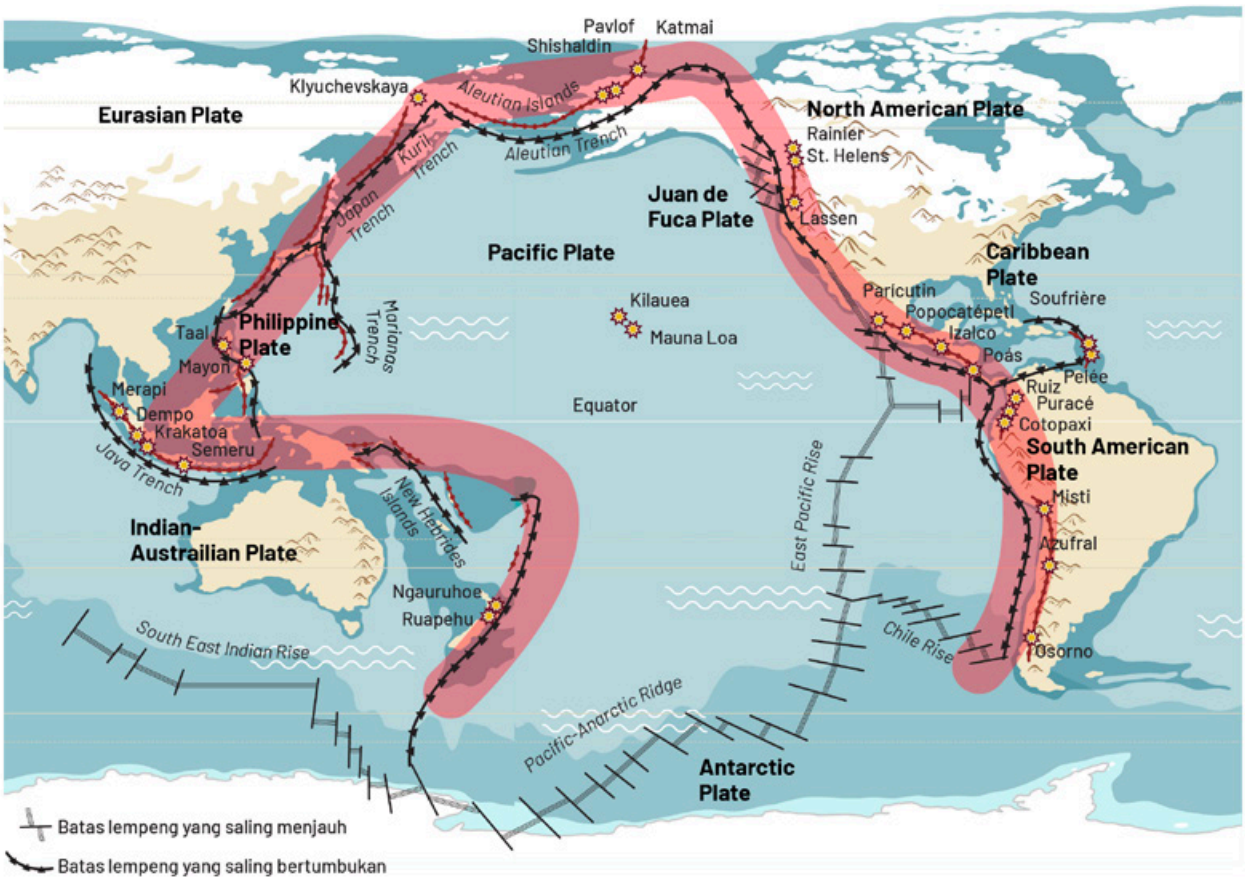


pendingin kawasan untuk kota-kota yang mengalami panas ekstrem; jaringan panas bumi untuk rumah sakit dan kampus; serta panas geotermal untuk pemanfaatan langsung dalam pengolahan makanan, tekstil, pulp dan kertas, serta farmasi. Fasilitas-fasilitas ini jauh lebih kecil daripada pembangkit listrik skala utilitas sehingga tidak butuh waktu pembangunan yang lama. Waktu pengeboran lebih singkat, dan fasilitas-fasilitas ini menggunakan lebih sedikit air, sehingga memberikan manfaat lingkungan lokal yang lebih besar, termasuk udara yang lebih bersih, kegiatan operasional stabil, dampak visual minimal, dan kebisingan yang lebih sedikit.

Seperti pembangkit energi lain, pembangkit panas bumi juga memiliki risiko lingkungan yang perlu ditangani. Risiko yang terkait dengan pembangkit panas bumi bervariasi tergantung pada lokasi dan jenis sistem panas bumi yang digunakan. Risiko tersebut dapat meliputi pencemaran air tanah, penurunan tanah, hilangnya keanekaragaman hayati, dan kerusakan pada lahan konservasi. Secara historis, pembangunan panas bumi di Indonesia cukup menantang, terutama untuk sistem hidrotermal konvensional. Namun, saat ini, teknologi panas bumi baru membantu meminimalkan dampak, dan strategi mitigasi telah meningkat.

Banyak contoh penerapan panas bumi dari negara lain yang patut ditiru. Kosta Rika, Amerika Serikat, dan Jerman telah mengembangkan proyek panas bumi, sembari tetap melindungi lingkungan dan melibatkan komunitas lokal. Banyak juga contoh proyek panas bumi dan pendinginan generasi baru (dengan waktu konstruksi yang singkat) yang telah menghilangkan sebagian besar potensi munculnya hidrogen sulfida, serta memungkinkan

CINCIN API PASIFIK



Gambar 8.1: Negara-negara yang terletak di Cincin Api Pasifik, dengan fitur tektonik dan vulkanik yang relevan. Sumber: Encyclopaedia Britannica. (2025). *Ring of fire*; Roque, P. J. C., Violanda, R. R., Bernido, C. C., & Soria, J. L. A. (2024). Earthquake occurrences in the Pacific Ring of Fire exhibit a collective stochastic memory for magnitudes, depths, and relative distances of events. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 637*, 129569.



produksi panas bumi di luar lapangan konvensional.

Dengan pedoman teknis jelas, pemantauan yang transparan, peningkatan standar reinjeksi dan integritas sumur, serta perlindungan keanekaragaman hayati, Indonesia dapat memperluas pengembangan panas bumi sembari melindungi hutan, satwa liar, dan kekayaan ekosistem alam.

Dengan menggabungkan keahlian panas bumi kelas dunia, Indonesia dapat memperluas kepemimpinannya dalam bidang panas bumi untuk menciptakan lebih banyak manfaat dan dampak yang lebih sedikit. Bab ini menjelaskan potensi dampak lingkungan dalam konteks Indonesia, serta merinci strategi untuk meminimalkan dampak tersebut.

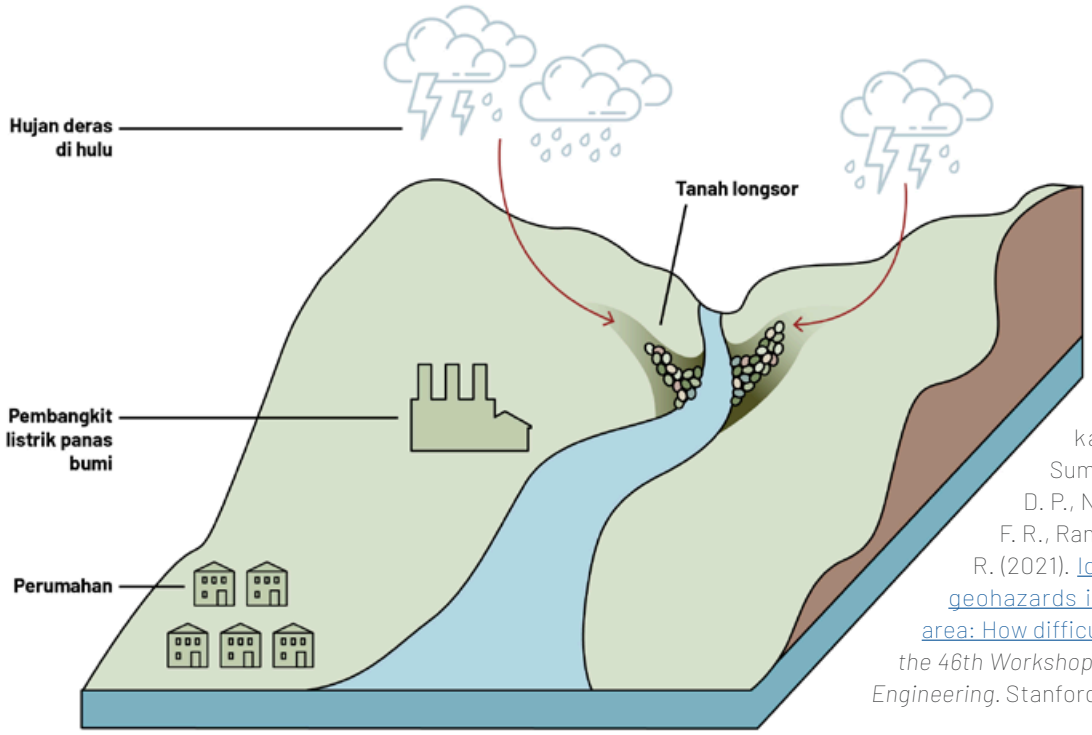
KEUNIKAN KONDISI LINGKUNGAN INDONESIA

Kondisi Geografi dan Aktivitas Vulkanik

Indonesia termasuk salah satu wilayah paling aktif secara vulkanik di dunia karena terletak langsung di atas Cincin Api Pasifik, sebuah zona sepanjang sekitar 40.000 kilometer yang melingkari Samudra Pasifik seperti tapal kuda (Gambar 8.1). Sabuk ini menandai titik pertemuan beberapa lempeng litosfer utama, termasuk Lempeng Indo-Australia, Pasifik, dan Eurasia, yang menyebabkan aktivitas tektonik seperti gempa bumi dan letusan gunung berapi, sehingga sering mengubah lanskap di sekitarnya. Sekitar 90% gempa bumi di dunia terjadi di area Cincin Api Pasifik, termasuk sebagian besar gempa besar.[1] Atribut bawah permukaan yang unik ini juga memberikan Indonesia kekayaan sumber daya panas bumi dan menghadirkan tantangan unik dalam pengembangan dan pengelolaan infrastruktur energi, termasuk sistem panas bumi.

Sebagian besar pulau-pulau di Indonesia terletak dekat khatulistiwa dan menerima curah hujan antara 2.000 milimeter dan 4.000 milimeter setiap tahun.[2] Banyak sumber panas bumi konvensional, termasuk mata air panas, juga terletak di lereng stratovolcano yang curam, tidak stabil, dan berrelief tinggi. Kombinasi curah hujan yang tinggi dan medan yang tidak stabil menciptakan risiko geologi yang tinggi, seperti tanah longsor dan banjir bandang.[3] Tanah longsor menjadi perhatian khusus karena dapat dipicu oleh beberapa faktor, yaitu curah hujan yang

ILUSTRASI BANJIR BANDANG DI AREA PANAS BUMI



Gambar 8.2: Ilustrasi banjir bandang yang terkait dengan kawasan panas bumi. Sumber: Chandra, V. R., Purba, D. P., Nayoan, A. G. P., Fadhillah, F. R., Ramadhan, R. F., &. Anggara, R. (2021). Identifying and assessing geohazards in Indonesia geothermal area: How difficult is it? In *Proceedings of the 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States.

intens, aktivitas seismik, perubahan penggunaan lahan, dan beban berlebih pada lereng.[4] Setidaknya empat bencana longsor signifikan telah tercatat di lapangan panas bumi konvensional Indonesia: Wayang Windu (2015), Sungai Penuh (2013), Hululais (2016), dan Pulau Lembata (1979). Beberapa bencana longsor terkait dengan faktor panas bumi, termasuk manifestasi hidrotermal alami yang melemahkan lereng dan aktivitas proyek seperti getaran yang timbul dari peralatan berat. Temuan ini menyoroti pentingnya mengelola risiko longsor dalam pengembangan panas bumi hidrotermal.[5]

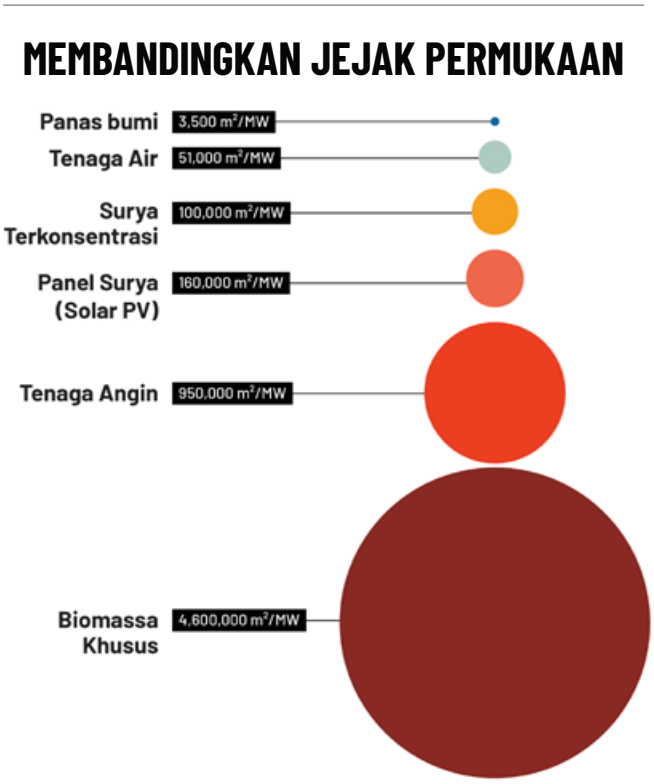
Banjir bandang—di mana curah hujan di daerah hulu menghasilkan volume air melebihi kapasitas aliran sungai—juga menjadi bahaya khusus di beberapa wilayah, sehingga kondisi ini perlu menjadi pertimbangan. Jika longsor menghalangi aliran sungai dan membentuk bendungan sementara, air akan menumpuk di belakangnya. Pecahnya bendungan tersebut dapat menyebabkan aliran air tiba-tiba yang deras ke hilir (**Gambar 8.2**)

Letusan gunung berapi, tentu saja, juga merupakan risiko. Indonesia memiliki 128 gunung berapi aktif (sekitar 13% dari total gunung berapi dunia),[6] dan hampir semua lapangan panas bumi konvensional di Indonesia terletak di zona vulkanik, sehingga risiko letusan perlu menjadi perhatian utama. Misalnya, letusan Gunung Tangkuban Perahu pada Agustus 2019 yang menyebabkan penutupan sementara lapangan hidrotermal terdekat. Insiden tersebut memicu seruan untuk kerja sama yang lebih erat antara pengembang panas bumi dan lembaga vulkanologi guna mengurangi risiko semacam itu.[7,8]

KEANEKARAGAMAN HAYATI DAN EKOSISTEM

Menurut Conservation International, Indonesia merupakan salah satu dari 17 negara mega-diverse di dunia,[9] sebuah klasifikasi untuk negara-negara dengan tingkat kekayaan spesies dan endemisme yang sangat tinggi. Dengan hutan hujan, rawa gambut, mangrove, dan terumbu karang di lebih dari 17.000 pulau, Indonesia menampung sekitar 17% spesies burung dunia, 12% mamalia, dan 10% spesies tumbuhan berbunga.[10,11] Ekosistem ini menyediakan sistem keamanan lingkungan yang vital—mengatur banjir; menyimpan jumlah karbon skala besar; dan menyediakan makanan, air bersih, dan bahan baku—namun deforestasi, fragmentasi habitat, dan eksploitasi berlebihan mengancam keanekaragaman hayati ini. Di periode tahun 2001-2022, Indonesia kehilangan sekitar 9,75 juta hektar tutupan hutan, sebagian besar di wilayah yang kaya akan keanekaragaman hayati seperti Kalimantan dan Sumatra.[12] Kerangka konservasi Indonesia—melalui Strategi dan Rencana Aksi Keanekaragaman Hayati Indonesia (IBSAP) dan komitmen untuk memperluas kawasan lindung menjadi 32,5 juta hektar pada tahun 2030—berupaya mengatasi tantangan ini. IBSAP menyoroti peran keanekaragaman hayati dalam mendukung ketahanan lingkungan, termasuk yang relevan dengan pengembangan panas bumi.

Karena banyak sumber daya panas bumi berpotensi tinggi yang terletak di dalam atau dekat hutan konservasi, memperluas pemanfaatan sumber energi terbarukan ini harus menyeimbangkan manfaat iklim dengan kewajiban untuk melindungi keanekaragaman hayati. Panas bumi memiliki jejak lingkungan yang sangat kecil—terkecil di



Gambar 8.3: Luas lahan yang dibutuhkan per hektar untuk kapasitas pembangkit 1 gigawatt, panas bumi memiliki luas lahan terkecil dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lainnya dan batu bara. PV = fotovoltaik. Sumber: Lovering, J., Swain, M., Blomqvist, L., & Hernandez, R. R. (2022). Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape. *PLOS ONE, 17*(7), e0270155; National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2022). *Land use by system technology.*

LOKASI DAN KAPASITAS PANAS BUMI KONVENSIONAL DI INDONESIA BERDASARKAN STATUS PENGGUNAAN LAHAN

Status Penggunaan Lahan	Jumlah Titik Potensi Panas Bumi	Kapasitas Potensial (MW)
Area konservasi	48	4,873
Hutan lindung	54	5,736
Hutan produksi	46	2,416
Area non-hutan	182	8,056
Total	**330**	**21,081**

Gambar 8.4: Lokasi panas bumi konvensional dan kapasitas potensial berdasarkan status penggunaan lahan di Indonesia. MW = megawatts. Sumber: Meijaard, E., Dennis, R. A., Saputra, B. K., Draugelis, G. J., Qadir, M. C. A., & Garnier, S. (2019). *Rapid environmental and social assessment of geothermal power development in conservation forest areas of Indonesia*. PROFOR & World Bank.

antara semua sumber energi terbarukan (lihat **Gambar 8.3**). Namun, sekitar 28.600 hektar deforestasi—kurang dari setengah persen dari total lahan—berhubungan langsung dengan proyek pengembangan panas bumi yang sudah ada.[13]

Catatan penting lain adalah bahwa seiring dengan perluasan pengembangan sumber daya panas bumi yang melimpah di Indonesia, teknologi panas bumi generasi baru akan memungkinkan pengembang untuk fokus pada wilayah yang memiliki risiko banjir dan tanah tidak stabil yang lebih rendah, yang umumnya ditemukan di wilayah Cincin Api.

Sementara itu, menurut studi yang dilakukan oleh Profor dan Bank Dunia, sekitar 8.000 megawatt potensi tenaga panas bumi konvensional terletak di luar kawasan hutan,[14] sehingga menyediakan peluang untuk memprioritaskan pengembangan panas bumi di zona berisiko rendah (lihat **Gambar 8.4**). Namun, ketika mempertimbangkan sumber daya panas bumi generasi baru, angka tersebut melonjak menjadi 2.160 gigawatt di luar kawasan lindung. Lihat **Gambar 8.8** dan lampiran Bab 3 "Memperluas Cakupan: Peluang Geotermal Generasi Baru" untuk informasi lebih lanjut.

Di negara lain, proyek panas bumi sebenarnya telah membantu menciptakan ekosistem bagi tumbuhan dan spesies. Di Inggris, pengelola Eden Project telah menanam parit-parit dengan campuran benih yang beragam, menciptakan habitat baru yang subur bagi berbagai jenis burung dan hewan penyerbuk. Mereka juga melindungi pohon ek, ladang *willow carr*, dan keanekaragaman hayati lain yang ada.

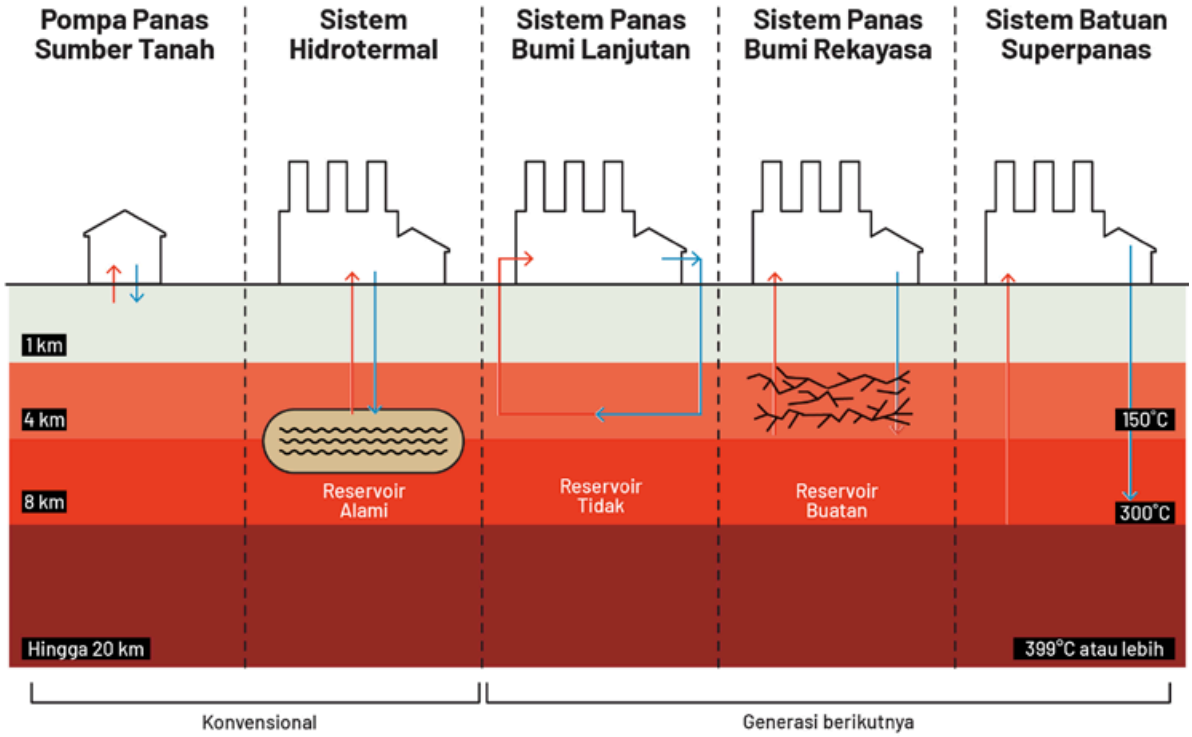
Catatan penting lain adalah bahwa seiring dengan perluasan pengembangan sumber daya panas bumi yang melimpah di Indonesia, teknologi panas bumi generasi baru akan memungkinkan pengembang untuk fokus pada wilayah yang memiliki risiko banjir dan tanah tidak stabil yang lebih rendah, yang umumnya ditemukan di wilayah Cincin Api.

POTENSI DAMPAK LINGKUNGAN DARI PENGEMBANGAN PANAS BUMI

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, salah satu keunggulan utama panas bumi dibandingkan sumber energi lainnya adalah penggunaan lahan yang paling sedikit. Pembangkit listrik panas bumi hanya membutuhkan seperlima dari luas lahan yang dibutuhkan pembangkit listrik tenaga surya dan sepersepuluh dari luas lahan yang dibutuhkan pembangkit listrik tenaga angin di darat—serta jumlah yang sangat kecil (satu per tujuh puluh) dibandingkan dengan pembangkit listrik



JENIS-JENIS SISTEM ENERGI PANAS BUMI



Gambar 8.5: Perbandingan teknologi pembangkit listrik tenaga panas bumi utama yang menggambarkan variasi jenis sumber daya dan metode ekstraksi panas untuk produksi listrik dan pemanfaatan langsung di sektor industri. Pompa panas sumber tanah (GSHP) menggambarkan skenario pemanasan bangunan. Dalam skenario GSHP, aliran fluida dapat dibalik untuk menyediakan pendinginan.Sumber: Adapted from D'avack, F., & Omar, M. (2024). *Infographic: Next-generation technologies set the scene for accelerated geothermal growth*. S&P Global.

PROYEK POMPA PANAS GEOTERMAL SKALA KOMERSIAL DI SWISS



Gambar 8.6: Tim pembuat sumur bersiap untuk mengebor serangkaian sumur panas bumi dangkal untuk menyediakan sistem pemanasan dan pendinginan skala komersial di kawasan perkotaan Lausanne, Swiss. Sumber foto dari Groupe Grisoni.

biomassa. Fasilitas panas bumi umumnya memerlukan infrastruktur yang jauh lebih sedikit dibandingkan sumber energi lain, dengan pembangkit listrik panas bumi tipikal hanya memerlukan 1.500 meter persegi per megawatt-jam (0,37 acre per megawatt-jam) dibandingkan dengan 40.000 meter persegi per megawatt-jam (9,9 acre per megawatt-jam) untuk pembangkit listrik batu bara.[15] Teknologi panas bumi generasi baru yang sedang berkembang memerlukan ruang yang lebih sedikit lagi, seperti sumur sirkulasi air tanah tunggal untuk pemanfaatan langsung atau sumur panas bumi ganda untuk produksi listrik.

Proyek panas bumi pengeboran dalam yang hanya menghasilkan panas untuk kebutuhan industri bahkan lebih efisien dan dapat diadaptasi untuk digunakan di kawasan perkotaan. Banyak kompleks bangunan besar pengguna panas dari panas bumi yang sudah memiliki akses ke lahan untuk pengembangan dan pengeboran. Ini adalah salah satu keuntungan jelas dari teknologi ini dibandingkan dengan sumber energi lain. Teknologi ini membutuhkan lahan yang lebih sedikit dan merusak lingkungan lebih minim.

EMISI GRK GLOBAL BERDASARKAN SUMBER LISTRIK

Teknologi	Rentang Emisi GRK (gCO_2/kWh)	Catatan
Panas Bumi Konvensional (hidrotermal, flash/binary)	10–120	Sangat bergantung pada lokasi karena kandungan gas non-kondensasi (NCG); lapangan di Indonesia seperti Dieng (lebih tinggi, ~100+) dibandingkan Lahendong (lebih rendah, <50). Reinjeksi mengurangi emisi.
Engineered Geothermal Systems (EGS)	5–40	Masih dalam skala percobaan; sebagian besar emisi berasal dari pengeboran dan konstruksi. Tidak ada pelepasan NCG karena reservoir telah dirancang secara teknis.
Advanced Geothermal Systems (AGS, closed-loop)	<5–15	Nilai perkiraan (belum ada skala komersial); emisi hanya berasal dari bahan material dan proses konstruksi.
Batubara (subcritical hingga supercritical, tanpa CCS)	820–1050	Salah satu yang tertinggi; jaringan listrik dominan di Indonesia dengan rata-rata emisi ~900.
Gas alam (CCGT)	400–500	Lebih rendah dari batu bara, tetapi kebocoran metana dapat menyebabkan emisi yang lebih tinggi.
Panel Surya (PV)	20–60	Sebagian besar emisi berasal dari proses pembuatan panel surya.
PLTB onshore (darat)	8–20	Sangat rendah: Sebagian besar emisi berasal dari baja dan beton pada turbin.
Energi Air (reservoir besar)	1–250	Rentang emisinya luas; reservoir tropis (seperti Indonesia) dapat menghasilkan lebih banyak metana.

Gambar 8.7: Emisi gas rumah kaca (GRK) global berdasarkan sumber energi. CCS = penangkapan dan penyimpanan karbon; CCGT = turbin gas siklus gabungan; gCO2/kWh = gram karbon dioksida per kilowatt-jam. Sumber: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press; International Energy Agency (IEA). (2022). *Renewables 2022*; International Energy Agency (IEA). (2023). *Net zero roadmap: A global pathway to keep the 1.5°C goal in reach*; O'Sullivan, M., Gravatt, M., Popineau, J., O'Sullivan, J., Mannington, W., & McDowell, J. (2021). Carbon dioxide emissions from geothermal power plants. *Renewable Energy, 175*, 990–1000; Geothermal Technologies Office. (2019). *GeoVision: Harnessing the heat beneath our feet*. U.S. Department of Energy.



Seperti dijelaskan dalam Bab 4, "Melampaui Listrik: Permintaan Energi Termal Indonesia dan Potensi Pemanfaatan Langsung Panas Bumi," Indonesia memiliki potensi besar untuk memanfaatkan panas bumi untuk pendinginan urban, sebagaimana yang telah dilakukan di Eropa secara luas. Banyak kota yang menggunakan panas bumi untuk pemanasan kawasan urban atau untuk memanaskan dan mendinginkan bangunan. Di instalasi panas bumi di Lausanne, Swiss, total ada 150 sumur bor—masing-masing berkedalaman 300 meter dan dilengkapi dengan double-U probe berefisiensi tinggi—kini menggerakkan sistem pemanasan dan pendinginan di lokasi tersebut. Pengeboran di kawasan perkotaan memiliki jejak lingkungan yang kecil. Setelah mulai bekerja, sistem ini menyediakan pemanasan dan pendinginan yang andal sepanjang masa pakai bangunan.[16]

Dengan demikian, perlu diambil langkah hati-hati pada setiap tahap pengembangan dan operasional pembangkit panas bumi untuk memitigasi risiko lingkungan. Secara umum, proyek panas bumi memiliki tiga tahap: eksplorasi, pengeboran dan konstruksi pembangkit, serta operasional pembangkit. Bagian-bagian berikut menjelaskan kondisi dampak lingkungan pada setiap tahap.

DAMPAK DARI KEGIATAN EKSPLORASI DAN KONSTRUKSI PANAS BUMI

Eksplorasi

Sebagian besar teknik eksplorasi panas bumi bersifat non-invasif dan observasional. Terkadang, metode pengambilan sampel menyentuh area sensitif, tetapi aktivitas ini umumnya memiliki dampak lingkungan yang minim. Namun, beberapa metode eksplorasi memang memiliki dampak yang lebih besar. Beberapa survei panas bumi membutuhkan pembangunan jalan dan jaringan infrastruktur yang dapat menyebabkan penghilangan habitat alam dan vegetasi. Ketika diperlukan pembangunan infrastruktur baru, pengembang harus memastikan bahwa kegiatannya menimbulkan dampak lingkungan yang minim.

Kasus lapangan Baturraden di Jawa Tengah menyoroti masalah ini. Selama fase eksplorasi pada tahun 2016–2017, air Sungai Prukut yang mengalir dari lereng Gunung Slamet berubah menjadi cokelat. Pemantauan menunjukkan bahwa pengembang panas bumi PT Sejahtera Alam Energi bertanggung jawab atas hal ini. Warga lokal juga menyebutkan bahwa mereka mengalami kesulitan dalam mengakses air bersih.

Beberapa proyek juga membutuhkan sumur eksplorasi untuk mengetahui kondisi bawah permukaan dari proyek geotermal yang diusulkan. Sumur eksplorasi membutuhkan pengeboran lubang berdiameter kecil, mirip dengan ukuran pengeboran eksplorasi yang umum dilakukan di proyek pertambangan. Untuk sumur bor, gangguan lahan terjadi terbatas pada lokasi pengeboran seluas beberapa ratus meter persegi, dimana perusahaan melakukan pembabatan tanaman dan membangun jalan akses sementara. Meskipun terjadi kebisingan, lalu lintas kendaraan, dan pergeseran tanah selama pengeboran, tingkat kebisingan yang dihasilkan relatif kecil dan durasinya singkat, terlebih lagi lokasi tersebut dapat dipulihkan kembali setelah sumur bor selesai digunakan. Sumur bor yang ditinggalkan harus ditutup dengan aman.

Pemerintah Indonesia memandang serius masalah lingkungan yang terjadi akibat aktivitas proyek. Untuk setiap proyek, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan mewajibkan Penilaian Dampak Lingkungan (Environmental Impact Assessment/EIA) sebagai persyaratan regulasi. EIA berlaku untuk pengembangan panas bumi konvensional maupun non-konvensional; hal ini untuk memastikan bahwa dampak lingkungan dan sosial yang potensial dievaluasi secara menyeluruh, serta konsultasi publik dilakukan sebelum diberikannya persetujuan dan perizinan proyek. Lihat Bab 6, "Jejak Bersama: Membangun Kepercayaan dan Transparansi dalam Transisi Energi Indonesia," untuk informasi lebih lanjut.

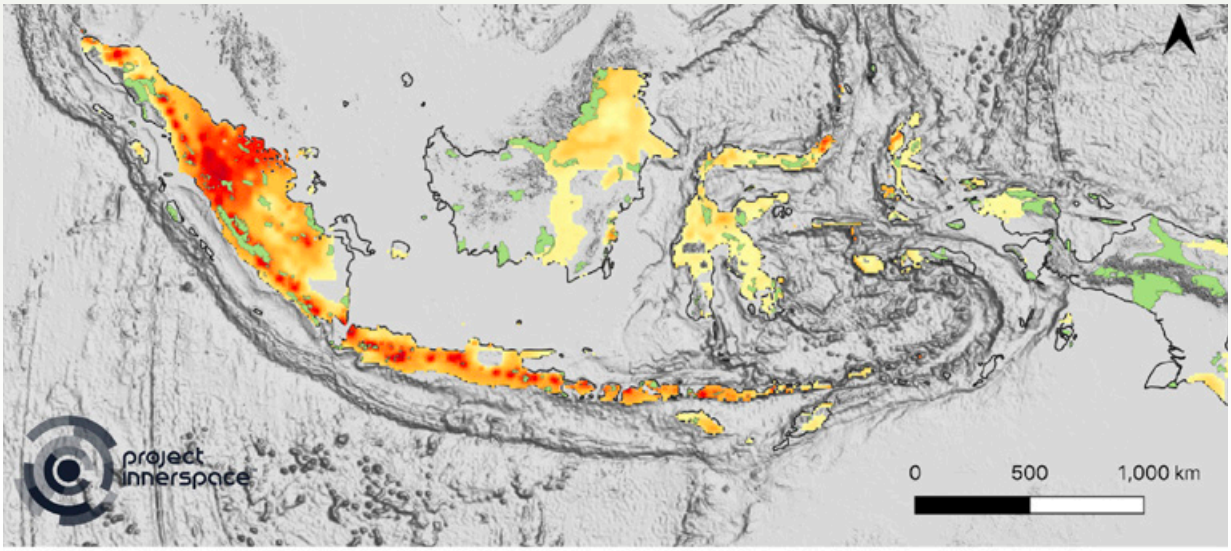
Konstruksi

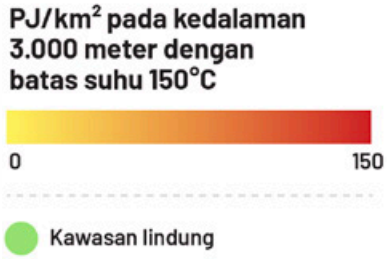
Fase konstruksi pembangkit listrik adalah fase yang paling berdampak, sekaligus yang paling berisiko. Pembangkit listrik memerlukan permukaan yang luas untuk instalasi infrastruktur, seperti landasan pengeboran, sumur produksi dan injeksi, pipa, serta pembangkit listrik itu sendiri. Meskipun pembangkit listrik panas bumi memiliki jejak permukaan terkecil dibandingkan sumber energi lainnya (lihat **Gambar 8.3**),[17] lokasi sumur-sumur panas bumi biasanya tersebar sehingga dalam beberapa kasus dampak lingkungan terjadi di area yang luas. Di Indonesia, banyak situs panas bumi konvensional yang berpotensi



Menurut analisis GeoMap dari Project InnerSpace, Indonesia memiliki potensi panas bumi yang sangat besar meskipun tanpa memasukkan potensi di area-area terlindungi. Dengan memanfaatkan potensi panas bumi hingga kedalaman 5 kilometer, Indonesia dapat menikmati energi panas bumi sebesar 2.160 gigawatt—setara dengan lebih dari 21 kali kapasitas listrik terpasang total pada tahun 2024 (lihat lampiran Bab 3, "Memperluas Cakupan: Peluang Geotermal Generasi Baru"). Analisis ini menunjukkan bahwa pengembangan panas bumi mungkin dilakikan di luar kawasan hutan lindung, dan dengan praktik pengeboran dan desain pembangkit yang lebih baik saat ini, pengembangan panas bumi generasi baru dapat dilakukan dengan dampak lingkungan yang jauh lebih kecil dibandingkan proyek panas bumi konvensional Indonesia pada beberapa dekade sebelum ini (lihat **Gambar 8.8**).

TOTAL HEAT-IN-PLACE PANAS BUMI INDONESIA DENGAN KAWASAN LINDUNG





Gambar 8.8: Potensi panas bumi total di Indonesia berdasarkan data GeoMap dan kawasan lindung di Indonesia. Peta ini menyoroti wilayah-wilayah dengan potensi panas bumi terbesar di Indonesia. Peta ini menggambarkan potensi kumulatif hingga kedalaman 3 kilometer untuk memastikan perbedaan yang jelas antara wilayah-wilayah tersebut. Jika analisis diperluas hingga kedalaman 5 kilometer, hampir seluruh peta akan berwarna merah, sehingga menghilangkan kontras dan elemen pada peta. Sumber: Protected Planet. (2025). *World database on protected areas*; Project InnerSpace. (2025). *GeoMap*.

tinggi untuk tumpang tindih dengan kawasan hutan konservasi, sehingga menimbulkan risiko deforestasi, fragmentasi habitat, dan gangguan ekosistem.[18] Kekhawatiran ini terutama terjadi di hutan pegunungan yang kaya akan keanekaragaman hayati.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, teknologi generasi baru seperti engineered geothermal system (EGS) dan advanced geothermal system (AGS) dapat mengurangi kerusakan permukaan secara lebih signifikan (lihat Bab 1, "Panas Bumi 101: Gambaran Umum tentang Teknologi dan Aplikasi Panas Bumi Terbaru"). Ukuran lahan yang lebih kecil dari instalasi AGS dan EGS mengurangi gangguan terhadap tanah, serta memungkinkan pengembangan panas bumi di luar lahan pertanian dan gunung berapi yang dilindungi, sehingga meminimalkan risiko degradasi tanah dan kerusakan pada lahan yang sensitif. Di Indonesia, beberapa lahan memiliki nilai suci atau budaya bagi komunitas lokal; lahan-lahan ini membutuhkan protokol khusus untuk pengembangan di luar perlindungan ekologi semata.

PELAJARAN DARI NEGARA LAIN

Selama pembangunan PLTP Gunung Salak di Taman Nasional Gunung Halimun Salak, Jawa Barat, konstruksi PLTP menyebabkan pembukaan hutan dan hilangnya habitat, erosi tanah, perubahan kualitas air sungai, peningkatan kadar hidrogen sulfida di udara sekitar, serta kemacetan lalu lintas dan kecelakaan di jalan-jalan yang sempit. Pengembang menerapkan beberapa langkah mitigasi, termasuk reboisasi dan upaya untuk menghindari fragmentasi hutan.[19]

Selain itu, pembangunan infrastruktur di daerah vulkanik dan berbukit dapat mengganggu fungsi daerah aliran sungai, mengurangi stabilitas tanah, dan meningkatkan erosi serta sedimentasi di sungai. Untuk panas bumi hidrotermal, pengembangan jangan sampai merusak fitur di atas permukaan seperti fumarol dan mata air panas, yang sering dianggap sebagai kekayaan ekologi dan landmark budaya yang penting.[20]

Kosta Rika memberikan pelajaran penting tentang cara mengurangi dampak-dampak lingkungan tersebut. Proyek panas bumi Kosta Rika—pembangkit listrik Las Pailas I dan II serta pembangkit listrik Borinquen (masih dalam perencanaan)—berlokasi di lereng gunung berapi di luar batas taman nasional untuk menghindari kerusakan ekosistem penting.[21] Negara ini menggunakan pengeboran sumur berarah (*directional well*) dan platform sumur ganda (*multi-well pad*) untuk mengurangi gangguan di permukaan, dan didesain untuk langsung menghubungkan setiap platform produksi ke unit pemisahan dan reinjeksi, sehingga membatasi jumlah pipa. Praktik reinjeksi membantu menstabilkan reservoir, mengurangi kebutuhan area pengeboran baru, dan memperpanjang umur operasional pembangkit listrik yang ada tanpa perlu mengembangkan lahan baru.[22]

Praktik ini relevan untuk Indonesia, di mana para pengembang dapat mengurangi jejak ekologis pengembangan panas bumi dengan mewajibkan instalasi

KOMPOSISI GAS TIDAK BERKONDENSASI (NCG) DAN BATAS AMBANG BAHAYA PADA EKOSISTEM PANAS BUMI

Gas	Porsi rata-rata NCG	Masalah Utama	Level Dampak
Karbon dioksida	90%–99%	Emisi GRK, gas penyebab sesak napas di ruang tertutup, kematian vegetasi	>0.5% (5,000 ppm, batas 8 jam OSHA), >4% berbahaya bagi manusia
Hidrogen sulfida	0.1%–3%	Toksistas akut pada manusia, korosif, beracun ke tumbuhan dan ekosistem air.	>10 ppm iritasi, >100 ppm berbahaya, >500 ppm mematikan
Metana	0.1%–1%	Emisi GRK yang sangat kuat (GWP ~28–34), bahaya ledakan	5%–15% eksplosif di udara
Amonia	<0.1%	Iritasi bagi manusia (paru-paru/mata), beracun bagi tumbuhan	>25 ppm berbahaya (batas OSHA)
Lainnya (Nitrogen, Hidrogen, Radon)	Kecil	Sebagian besar tidak reaktif, kecuali radon (risiko radiasi)	Bervariasi

Gambar 8.9: Komposisi *non-condensable gas* (NCG) dan ambang batas kerusakan dalam sistem panas bumi. GRK = gas rumah kaca; GWP = *global warming potential*; OSHA = *Occupational Safety and Health Administration*. Sumber: DiPippo, R. (2012). *Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact* (3rd ed.). Elsevier; Fridriksson, T., Mateos, A., Audinet, P., & Orucu, Y. (2016). *Greenhouse gases from geothermal power production*. World Bank; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *AR6 climate change 2022: Mitigation of climate change*. IPCC; OSHA. (2006). *Occupational safety and health standards–Air contaminants*. U.S. Department of Labor.

sumur di satu area bersama (terpusat), pengeboran sumur berarah dari luar zona konservasi, dan layout lapangan yang padat.

Emisi Gas Rumah Kaca

Secara luas, panas bumi dikategorikan sebagai sumber energi terbarukan dengan emisi rendah, sehingga sangat menarik bagi negara-negara seperti Indonesia yang memiliki potensi panas bumi melimpah.[23,24] Namun, sistem panas bumi tidak sepenuhnya bebas dari emisi gas rumah kaca, terutama selama fase konstruksi.[25,26,27] Saat membangun pembangkit panas bumi, 95% emisi umumnya terjadi selama konstruksi. Proses pengeboran dapat melepaskan gas ke atmosfer, termasuk karbon dioksida, metana, dan hidrogen sulfida.

Apabila memungkinkan, pengembang dapat menggunakan listrik untuk mengoperasikan alat bor, sehingga dapat mengurangi dampak sulfur dioksida dan senyawa organik volatil (volatile organic compound/VOC). Selain itu, minyak nabati terhidrogenasi (hydrogenated vegetable oil/HVO) dapat digunakan sebagai pengganti diesel untuk mengoperasikan generator, sehingga dapat mengurangi emisi karbon dioksida hingga 90%; hampir menghilangkan sulfur dioksida; dan secara signifikan mengurangi emisi nitrogen oksida, partikel halus, dan VOC.

Emisi utama dari produksi energi panas bumi berasal dari gas yang tidak dapat mengembun (non-condensable gases/NCGs) yang secara alami terdapat di reservoir panas bumi, terutama karbon dioksida dan, dalam jumlah yang lebih kecil, hidrogen sulfida, metana, dan jenis-jenis gas lainnya (lihat **Gambar 8.9**).[28,29] Gas-gas ini dilepaskan ke atmosfer selama masa pengeboran dan pengujian sumur.[30,31]

Konsumsi Air, Pengelolaan Cairan, dan Gangguan Tanah

Pengembangan panas bumi memerlukan banyak air, terutama selama proses pengeboran sumur. Satu sumur butuh antara 1.000 meter kubik hingga 3.000 meter kubik air, tergantung pada kondisi geologi dan teknologi pengeboran yang digunakan.[32,33] Di Indonesia, proyek panas bumi seringkali berlokasi di daerah pegunungan vulkanik yang tumpang tindih dengan hutan konservasi dan daerah aliran sungai yang memiliki keanekaragaman hayati dan daerah penyerap air.[34,35] Pada tahap awal pengembangan, pengelolaan lumpur pengeboran dan cairan panas bumi yang tidak tepat dapat mencemari sumber air permukaan dan air tanah di sekitarnya.[36]

Secara global, beberapa strategi mitigasi telah diterapkan untuk menyeimbangkan pengembangan panas bumi dengan keamanan air dan lingkungan, termasuk menyuntikkan kembali cairan panas bumi untuk mencegah kontaminasi, mengambil air bor dari reservoir yang secara khusus ditunjuk untuk penggunaan industri, dan menerapkan pengolahan limbah sebelum dibuang.[37,38] Panas bumi generasi baru, seperti sistem AGS dan EGS, menawarkan pendekatan alternatif yang dapat mengurangi risiko kontaminasi air secara lebih signifikan. Kemajuan dalam teknologi daur ulang air dan penggunaan air non-potable dalam ekplorasi panas bumi juga telah membantu mengurangi dampak.[39]

Mengingat kondisi geologis Indonesia yang sangat vulkanik, EGS kemungkinan besar bukan pilihan yang terbaik. Namun, teknologi AGS berpotensi dalam pengembangan panas bumi nasional, terutama di lokasi proyek panas bumi hidrotermal yang memiliki keterbatasan ketersediaan air atau sensitivitas lingkungan.

Pengembangan panas bumi di daerah pertanian juga perlu diperhatikan karena kontaminasi logam berat dan boron dapat masuk ke jalur irigasi, sehingga merusak kesuburan tanah, mengakibatkan keracunan tanaman, dan penurunan hasil panen. Di beberapa wilayah Indonesia, perluasan panas bumi dilaporkan juga menyebabkan pencemaran air, destabilisasi tanah, dan penurunan produktivitas tanaman. Temuan ini menyoroti bahwa limbah padat yang tidak terkelola tidak hanya mengancam kesuburan tanah tetapi juga secara langsung mempengaruhi ketahanan pangan di komunitas sekitar.

Regulasi pengelolaan limbah di Indonesia, khususnya Undang-Undang Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah,[40] menekankan pentingnya mengurangi ketergantungan pada tempat pembuangan akhir dan melindungi lingkungan, serta menyoroti kebutuhan akan kerangka kerja pengelolaan limbah yang kuat dan fleksibel. Dengan mengadopsi praktik pengelolaan limbah yang canggih dan memanfaatkan teknologi AGS, pengembang panas bumi dapat meminimalkan dampak limbah padat, melindungi kualitas tanah, serta memastikan energi panas bumi tetap menjadi sumber daya yang berkelanjutan.



Gempa Bumi Kecil akibat Aktivitas Manusia (*Induced Seismicity*)

Sistem EGS, yang sering membutuhkan retakan hidrolik, dapat mengaktifkan kembali garis patahan yang sudah ada, dan mengurangi kohesi batuan, sehingga menyebabkan gempa. Peristiwa gempa ini biasanya relatif kecil, tetapi terkadang injeksi dapat menghasilkan dampak getaran ke daerah yang lebih luas. Di daerah tektonik yang aktif, muncul kekhawatiran bahwa gempa-gempa kecil yang berulang dapat memicu pergeseran yang lebih besar pada patahan terdekat.[41,42,43]

Kasus-kasus ini menunjukkan bahwa dengan pembelajaran proaktif, pengendalian operasional yang adaptif, dan pemantauan berkelanjutan, peristiwa induced seismic di proyek panas bumi dapat dapat dikendalikan secara signifikan sambil tetap menjaga kegiatan operasional yang aman dan andal.

Undang-Undang Panas Bumi Nomor 21 Tahun 2014 memberikan kewenangan bagi pemerintah untuk mengawasi setiap fase proyek guna memastikan kepatuhan terhadap standar keselamatan, lingkungan, dan operasional.[44] Praktik global terkini menekankan kerangka kerja manajemen risiko modular.[45] Pendekatan ini mengintegrasikan (i) penyaringan awal lokasi untuk kesesuaian geologis dan stabilitas patahan; (ii) penilaian bahaya dan risiko menggunakan model geomekanik dan seismik; (iii) sistem adaptif yang terhubung dengan ambang batas operasional; (iv) penerapan jaringan pemantauan seismik *real-time*; dan (v) komunikasi transparan dengan regulator dan komunitas lokal. Beberapa proyek panas bumi di dunia telah berhasil menerapkan langkah-langkah ini.

Misalnya, di Soultz-sous-Forêts, Prancis, protokol stimulasi pengendali tekanan berhasil menjaga peristiwa seismik di bawah tingkat yang merusak.[46] Di Helsinki, Finlandia, proyek St1 Deep Heat menggunakan pemantauan seismik *real-time* untuk menyesuaikan laju injeksi dan menghindari eskalasi ke peristiwa dengan magnitudo lebih tinggi.[47] Di Amerika Serikat, pembangkit Blue Mountain di Nevada menggabungkan pemodelan risiko pra-operasional dengan sistem *traffic-light* responsif untuk menjaga tingkat gempa seismik yang rendah,[48,49] sementara situs penelitian *Utah Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy* (FORGE) telah menunjukkan bahwa penyaringan lokasi yang komprehensif dan injeksi bertahap dapat membatasi bahaya gempa seismik, bahkan di lingkungan tektonik yang kompleks.[50]

Kasus-kasus ini menunjukkan bahwa dengan pembelajaran proaktif, pengendalian operasional yang adaptif, dan pemantauan berkelanjutan, peristiwa induced seismic di proyek panas bumi dapat dapat dikendalikan secara signifikan sambil tetap menjaga kegiatan operasional yang aman dan andal.

Jika ingin menerapkan berbagai terobosan di atas, maka Indonesia akan memerlukan pemantauan seismik *real-time*, penerapan sistem *traffic-light* sebagai bagian dari izin proyek, menerapkan data seismik terpusat, dan prosedur persetujuan lokasi yang lebih ketat.

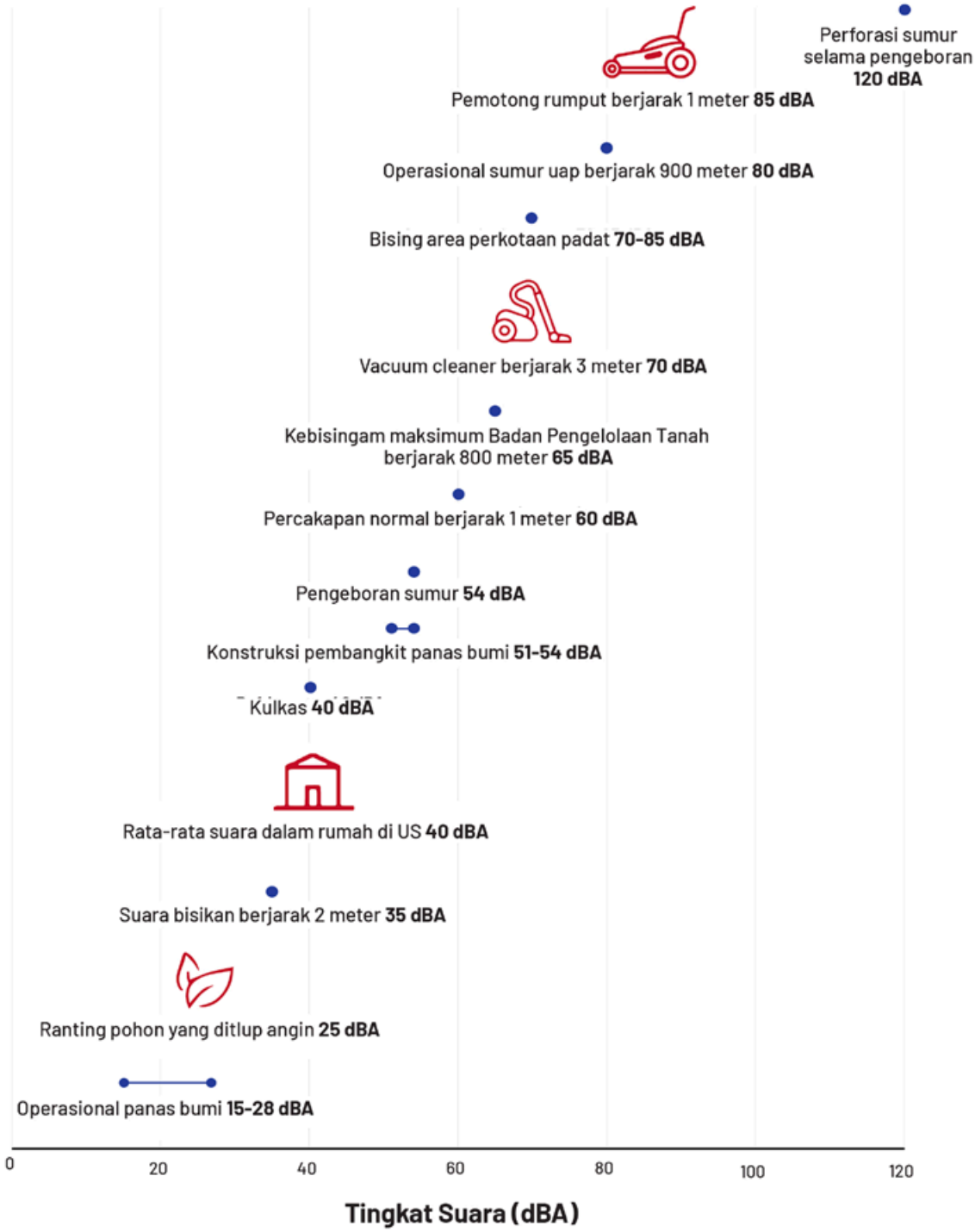
Polusi Suara

Pembangunan pembangkit listrik panas bumi dapat menimbulkan kebisingan yang signifikan, sehingga berpotensi mengganggu komunitas lokal dan satwa liar. Kebanyakan penilaian lingkungan mengabaikan poin polusi suara, tetapi dalam banyak situasi, hal ini dapat memiliki dampak yang kuat terhadap kesehatan manusia dan perilaku satwa liar—ini mengkhawatirkan karena pembangkit listrik tenaga panas bumi biasanya dibangun di daerah terpencil yang sensitif secara ekologi. Polusi suara di lingkungan ini dapat mengganggu pola makan, berkembang biak, dan migrasi satwa liar. Penelitian tentang dampak kebisingan panas bumi terhadap satwa liar masih terbatas.

Proyek Wae Sano di Flores (Manggarai Barat, Nusa Tenggara Timur) bisa menjadi contoh. Pembangkit listrik di proyek Program Pengembangan Hulu Energi Geotermal yang didukung Bank Dunia ini dapat menghasilkan antara 10 megawatt dan 32 megawatt. Di lingkungan pedesaan ini, mesin berat, konstruksi sumur, dan pengeboran menghasilkan suara kencang di atas tingkat kebisingan hutan yang rendah (siang hari = 44 dBA–49 dBA, malam hari = 39 dBA–44 dBA). Suara konstruksi yang dimodelkan mencapai sekitar 65 dBA pada jarak sekitar 100 meter dan sekitar 43 dBA pada jarak sekitar 500 meter; di sekitar pemukiman terdekat (sekitar 80 meter), suara maksimum



TINGKAT KEBISINGAN BERBAGAI FASE PENGEMBANGAN PANAS BUMI DIBANDINGKAN SUMBER SUARA LAIN



Gambar 8.10: Tingkat kebisingan pada berbagai fase pengembangan panas bumi dibandingkan dengan sumber kebisingan buatan manusia. Sumber: Kagel, A., Bates, D., & Gawell, K. (2005). *A guide to geothermal energy and the environment*. Geothermal Energy Association; Massachusetts Institute of Technology (MIT). (2006). Environmental impacts, attributes, and feasibility criteria. In MIT (Ed.), *The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century* (pp. 8-1–8-20). MIT; Bryant, M., Starkey, A. H., & Dick-Peddie, W. A. (1980). *Environmental overview for the development of geothermal resources in the State of New Mexico*. New Mexico Department of Energy; Birkle, P., & Merkel, B. (2000). Environmental impact by spill of geothermal fluids at the geothermal field of Los Azufres, Michoacán, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution, 124*, 371–410.

di siang hari dapat mencapai sekitar 70 dBA, melebihi batas kebisingan perumahan 55 dBA (lihat **Gambar 8.10**).[51] Fase pengujian sumur yang singkat dapat menghasilkan tingkat kebisingan hingga sekitar 110 dB di titik sumber, meskipun peristiwa ini bersifat episodik dan biasanya diatasi dengan peredam suara dan penghalang sementara.

Berita baiknya adalah hampir semua polusi suara ini akan hilang setelah konstruksi selesai dan operasional pembangkit dimulai.

FASE OPERASIONAL

Kabar baiknya, usia pembangkit listrik panas bumi biasanya cukup panjang. Setelah pembangkit listrik beroperasi, ada lebih sedikit masalah lingkungan yang perlu dipantau. Berikut ini adalah beberapa hal yang perlu dipantau setelah pembangkit listrik panas bumi beroperasi.

Emisi Permukaan

Emisi dari pembangkit listrik panas bumi konvensional di Indonesia sangat kecil jika dibandingkan dengan jumlah emisi dari pembakaran batu bara. Jika Indonesia dapat beralih dari batu bara ke panas bumi, negara ini dapat mengurangi emisi karbon dioksida lebih dari 90% dan mengurangi polutan udara lokal seperti sulfur dioksida, nitrogen oksida, dan partikel tersuspensi total. Namun, pembangkit listrik panas bumi konvensional di Indonesia tetap menghasilkan emisi, terutama melalui uap yang mengandung NCGs (*Natural Gas Contaminants*), termasuk karbon dioksida dan hidrogen sulfida.

Sebagai contoh, lapangan hidrotermal Wayang Windu berkapasitas 230,5 megawatt menghasilkan sekitar 65,9 gram setara karbon dioksida per kilowatt-jam dan sekitar 2.067 ton hidrogen sulfida per tahun.[52] Gas-gas lain, seperti metana dan amonia, serta unsur-unsur kecil seperti merkuri, arsenik, dan radon terdapat dalam konsentrasi yang kecil dan umumnya disuntikkan kembali ke reservoir sesuai dengan peraturan lingkungan nasional.[53]

Masalah lingkungan dan kesehatan utama ditimbulkan oleh gas hidrogen sulfida, yang memiliki bau khas "telur busuk" dan dapat berbahaya pada konsentrasi tinggi. Batas paparan kronis gas ini sangat rendah; Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) merekomendasikan tidak lebih dari 150 mikrogram per meter kubik selama periode 24 jam. Bahaya akut hanya terjadi pada konsentrasi sangat tinggi (sekitar 500 ppm–700 ppm) dan dapat mematikan

EMISI GRK PROYEK PANAS BUMI DI INDONESIA

Nama Proyek	Lokasi	Kapasitas Terpasang (MW)	Tipe Teknologi	Estimasi Emisi GRK (gCO_2e/kWh)	Pengembang / Operator
Wayang Windu	Jawa Barat	227	Uap kilat	73	Star Energy Geothermal
Sarulla	Sumatera Utara	330	Siklus ganda & uap kilat	100	Medco Power, Itochu, Ormat, INPEX
Lahendong	Sulawesi Utara	120	Uap kilat	60–80	PT Pertamina Geothermal Energy
Ulubelu	Lampung	220	Uap kilat	63	PT Pertamina Geothermal Energy
Kamojang	Jawa Barat	235	Uap kilat	73	PT Pertamina Geothermal Energy
Dieng & Patuha	Jawa Tengah & Jawa Barat	120	Uap kilat	65-75	Geo Dipa Energi

Gambar 8.11: Emisi gas rumah kaca (GRK) pada proyek panas bumi di Indonesia. gCO2e/kWh = gram karbon dioksida-ekivalen per kilowatt-jam; MW = megawatt. Sumber: Ea Energy Analyses. (2024). *Technology data for the Indonesian power sector: Catalogue for generation and storage of electricity*.

dalam waktu satu jam. Pemantauan lapangan, seperti di lokasi panas bumi Lumut Balai, telah mencatat tingkat hidrogen sulfida maksimum sekitar 0,54 ppm—jauh di bawah ambang batas toksisitas akut.[54]

Sebuah pemodelan di lapangan panas bumi Dieng menunjukkan bahwa mengalirkan NCGs melalui tangki pengurangan hidrogen sulfida dapat mengurangi konsentrasi hidrogen sulfida di dekat sumber dari sekitar 2 ppm hingga 5 ppm menjadi antara 0,4 ppm dan 1,0 ppm, sehingga aman karena di bawah ambang batas 5 ppm.[55] Meski pemodelan ini menunjukkan jalur mitigasi yang layak, hal ini tidak diwajibkan secara umum untuk semua pembangkit listrik panas bumi. Lapangan dengan cadangan hidrogen sulfida rendah, seperti Sarulla, dilaporkan menunjukkan emisi permukaan minimal, dengan konsentrasi terukur biasanya kurang dari 0,1 ppm, menunjukkan bahwa mengalitkan NCGs mungkin tidak diperlukan.[56] Namun, untuk lapangan "asam" seperti Dieng dan Lahendong—di mana tingkat hidrogen sulfida yang tinggi umum terjadi dan komunitas sekitar terpapar langsung—teknologi pengurangan emisi harus dipertimbangkan sebagai praktik standar.[57,58] Hal ini sejalan dengan peraturan kualitas udara Indonesia,[59] yang menetapkan batas ambien hidrogen sulfida sebesar 30 mikrogram per meter kubik (rata-rata 24 jam) dan batas ambang kerja sebesar 5 ppm.[60]

Dalam jangka panjang, teknologi generasi baru (lihat Bab 1, "Panas Bumi 101: Gambaran Umum tentang Teknologi dan Aplikasi Panas Bumi Terbaru") mewakili solusi strategis untuk mengatasi risiko emisi permukaan dan memperkuat kinerja lingkungan sektor panas bumi Indonesia. Studi pada proyek percontohan panas bumi generasi baru mendapatkan temuan emisi permukaan sebesar 32 gram CO_2-ekuivalen per kilowatt-jam untuk pembangkit EGS[61] dan 11,6 gram CO_2-ekuivalen per kilowatt-jam untuk AGS.[62]

SUMBER DAN JENIS LIMBAH PADAT DARI LAPANGAN PANAS BUMI

No.	Aktivitas	Sumber	Jenis Limbah Padat
1	Eksplorasi dan produksi	Pengeboran	Sisa Alat bor
		Uap Lapangan	Silika
		Kondensasi	Scale Lumpur
		Aktivitas kantor	Kertas Pembungkus kertas Plastik Kayu Baterai Limbah makanan Lampu neon bekas Alat pelindung diri (PPE) bekas
2	Perawatan	Pencucian	Scale
		Penggantian suku cadang	Spare part bekas Logam bekas Kaleng cat bekas Tinta Bekas Kaleng pelumas bekas
		Kebun	Daun Rumput
3	Analisis laboratorium	Pengolahan air	Lumpur
		Pengunaan bahan kimia	Kain yang terkontaminasi Bahan kimia kadaluwarsa Kaleng biocyte
4	Pembangkitan listrik	Menara pendingin	Scale

Gambar 8.12: Sumber dan jenis limbah padat di lapangan panas bumi. Sumber: Utami, A., Aji, N., Fadyah, A., Ghifari, A., Anam, M. B., Ramadhani, S., Rasyid, F. H., & Maulana, R. R. (2020). Geothermal energy solid waste management: Source, type of waste, and the management. *AIP Conference Proceedings*, *2245*(1), 060001.

Emisi Gas Rumah Kaca

Pembangkit panas bumi cenderung menghasilkan volume NCG yang jauh lebih rendah selama operasi dibandingkan selama tahap eksplorasi atau konstruksi. Di Indonesia, emisi karbon dioksida dari pembangkit panas bumi konvensional saat ini berkisar antara 42 gram hingga 73 gram karbon dioksida-ekuivalen per kilowatt-jam, dengan rata-rata 63 gram karbon dioksida-ekivalen per kilowatt-jam (lihat **Gambar 8.11**).[63]

Panas bumi generasi baru seperti AGS *closed-loop* menawarkan solusi untuk mengurangi emisi operasional. Sebagian besar gas yang berasal dari reservoir tetap terlarut atau terperangkap dalam sirkuit tertutup AGS, dan dalam kondisi operasi normal, gas-gas tersebut tidak dilepaskan ke permukaan.

Limbah Padat

Pengembangan panas bumi menghasilkan potongan bor, lumpur bor bekas, lumpur silika, material dari kegiatan pemeliharaan, dan limbah padat lain (**Gambar 8.12**) yang dapat mengancam kesehatan tanah, air, dan pertanian jika tidak dikelola dengan baik, terutama di daerah pedesaan dan kawasan dengan ekosistem alam sensitif di Indonesia.[64,65,66]

Pada saat yang sama, jika dikelola dengan baik, limbah padat panas bumi bisa digunakan kembali untuk bahan material. Lumpur silika dapat digunakan sebagai bahan pengikat tambahan dalam beton, sehingga meningkatkan kekuatan beton dan mengurangi ketergantungan pada bahan baku.[67,68] Potongan bor dapat digunakan sebagai agregat untuk konstruksi dasar jalan atau penutup landfill, serta lumpur bor berbahan bentonit memiliki potensi sebagai soil amendment untuk perbaikan kualitas tanah.[69]

Teknologi terbaru juga mampu mengubah limbah panas bumi menjadi silika berkualitas komersial dan mineral berharga lain, sehingga menjadi bukti pengembangan panas bumi berdampak pada strategi ekonomi sirkular.[70] Untuk mendukung ini, praktik pengelolaan limbah umum seperti pengomposan limbah organik, daur ulang bahan tidak berbahaya, dan penerapan pembuangan limbah berbahaya yang aman tetap menjadi hal esensial bagi operasi panas bumi di Indonesia.[71]

Di masa depan, panas bumi generasi baru menawarkan solusi untuk mengurangi risiko-risiko ini. Karena AGS menggunakan sistem tertutup dengan sirkulasi fluida melalui sumur tertutup (lihat Bab 1, "Panas Bumi 101: Gambaran Umum tentang Teknologi dan Aplikasi Panas Bumi Terbaru"), sistem ini tidak membutuhkan lumpur pengeboran bervolume besar seperti yang dibutuhkan oleh pembangkit hidrotermal konvensional. AGS juga menghasilkan lumpur terkontaminasi yang lebih sedikit.

Penurunan Tanah

Di Indonesia dengan aktivitas tektoniknya yang tinggi, kegiatan panas bumi kerap menimbulkan kekhawatiran serius terkait penurunan tanah, terutama ketika laju pengambilan fluida lebih tinggi daripada laju reinjeksi, seperti yang terjadi pada sistem panas bumi konvensional.[72,73] Pengambilan fluida yang berlebihan dapat mempengaruhi area reservoir sehingga permukaan tanah di atasnya terlihat tenggelam. Penurunan tanah dapat mengurangi efisiensi dan keberlangsungan sistem panas bumi karena mengurangi ruang pori dan jalur fracture, sehingga mengganggu penyimpanan dan pergerakan fluida.[74] Pemilihan teknologi panas bumi yang digunakan juga berperan di sini. Sistem konvensional, yang melibatkan ekstraksi dan reinjeksi fluida skala besar, lebih cenderung menyebabkan penurunan tanah. Namun, teknologi baru seperti sistem AGS sirkuit tertutup dirancang untuk mempertahankan tekanan reservoir, sehingga bisa mengurangi risiko penurunan tanah.

Beberapa lapangan panas bumi di Indonesia telah mengalami penurunan tanah yang signifikan akibat beban permukaan, patahan geologis, kompresi batuan yang berubah, dan faktor-faktor lain.[75] Tanah di Muara Laboh, misalnya, turun hingga 30 milimeter per tahun,[76] sedangkan tanah di Ulubelu rata-rata 3,3 milimeter per tahun.

Untuk mengurangi penurunan tanah yang disebabkan oleh pengembangan panas bumi, pengembang di negara-negara lain menyuntikkan kembali cairan panas bumi ke dalam reservoir untuk mempertahankan tekanan bawah tanah dan mencegah kompresi, di mana metode ini terbukti efektif dalam menstabilkan lapangan panas bumi Wairakei di Selandia Baru dan lapangan di kawasan Basin and Range di California.[77,78] Regulator dan pengembang juga dapat menerapkan program pemantauan menggunakan teknik survei leveling dan gravitasi untuk mengukur deformasi



tanah, serta teknologi pemantauan jarak jauh seperti InSAR, LiDAR, dan GNSS berpresisi tinggi untuk mendeteksi pergerakan permukaan di area luas. Kombinasi praktik ini membantu dalam mencegah atau meminimalisir dampak penurunan tanah, sembari memastikan keberlanjutan reservoir dalam jangka panjang.[79,80]

Konsumsi Air dan Pengelolaan Fluida

Jenis tanaman dan teknologi yang digunakan menentukan jumlah air yang dibutuhkan selama operasional panas bumi. EGS membutuhkan air terbanyak untuk mempertahankan tekanan reservoir dan menjaga kondisi retakan, sedangkan AGS membutuhkan air paling sedikit. Sistem AGS menghilangkan kebutuhan interaksi langsung dengan fluida bawah permukaan dengan mengalirkan fluida melalui sumur yang tertutup rapat, sehingga desain ini secara signifikan mengurangi risiko kontaminasi air tanah dan meminimalisir penggunaan air. Proyek percontohan di Jerman oleh Eavor Technologies dan di New Mexico oleh XGS Energy menunjukkan bahwa sistem AGS dapat beroperasi nyaris tanpa penarikan air, sehingga mengatasi masalah pengelolaan fluida di wilayah dengan keterbatasan air dan kondisi geologi yang sensitif terhadap air.

Polusi Suara

Pada tahap operasional, pembangkit listrik panas bumi menghasilkan suara bising dari aliran uap, turbin, dan sistem pendingin, meskipun pada tingkat yang lebih rendah dan stabil dibandingkan tahap konstruksi. Proyek Wae Sano, misalnya, menghasilkan kebisingan sebesar 55 dBA yang dapat didengar hingga jarak 500 meter. Pembangkit listrik dapat mengurangi kebisingan seperti ini dengan menggunakan beberapa hal seperti penutup akustik, kipas bersuara rendah, tanaman peredam, dan gundukan tanah.[81]

Tingkat kebisingan panas bumi biasanya relatif menengah, tetapi paparan jangka panjang tetap dapat mengganggu komunitas sekitar.[82] Untuk meminimalisir risiko, proyek panas bumi harus menerapkan teknologi pengurangan bising pada tahap konstruksi dan operasional, serta mematuhi batas bising lingkungan Indonesia (55 dBA untuk kawasan permukiman; 70 dBA untuk kawasan industri).[83] Langkah-langkah ini juga penting untuk melindungi ekosistem sensitif di mana satwa liar mungkin rentan terhadap suara bising berkepanjangan.

MASALAH LAIN

Injeksi atau ekstraksi cairan dari reservoir panas bumi dapat menyebabkan gempa bumi, dan lokasi Indonesia di Cincin Api Pasifik menjadikannya semakin rentan. Gempa bumi telah tercatat di zona aktif seperti lapangan panas bumi Muara Laboh di Sumatra, dengan terjadi gempa kecil berkekuatan antara −0.5 ≤ magnitudo momen (Mw) ≤ 2.0.[84] Kekhawatiran serupa juga dilaporkan terjadi di sekitar pembangkit panas bumi Gunung Salak dan Dieng. Penduduk yang tinggal dekat Gunung Salak melaporkan getaran sering terjadi sejak operasi dimulai, meskipun bukti ilmiah yang membuktikan hubungan langsungnya dengan panas bumi masih terbatas. Di wilayah Kepakisan dekat pembangkit Dieng, masyarakat sekitar juga mengaitkan peningkatan aktivitas gempa bumi dengan aktivitas panas bumi karena terjadi kerusakan bangunan disana.[85]

Sistem AGS dan superhot rock (SHR) merupakan pilihan yang lebih cocok untuk Indonesia mengingat aktivitas vulkanik yang tinggi dan letusan gunung api yang sering terjadi. Berbeda dengan sistem hidrotermal konvensional, AGS—yang beroperasi melalui desain sirkuit tertutup dan tidak bergantung pada reservoir bawah tanah atau permeabilitas fluida—memungkinkan ekstraksi panas geotermal di zona non-vulkanik atau yang lebih aman secara seismik.[86] Sistem SHR, yang memanfaatkan panas dari formasi batuan superkritis yang sangat dalam, menawarkan potensi output energi per sumur yang jauh lebih tinggi. Mengingat sumber panas vulkanik yang melimpah dan kondisi geologi yang sensitif di Indonesia, teknologi panas bumi generasi baru ini menyediakan alternatif yang lebih aman dan fleksibel untuk memperluas energi panas bumi di wilayah yang lebih luas dan stabil.[87] Untuk mengurangi risiko seismik, pengembang harus melakukan studi geologi dan pemetaan patahan yang komprehensif sebelum memulai eksplorasi, memprioritaskan lokasi berisiko rendah, mengelola tekanan injeksi fluida dengan hati-hati, dan menetapkan pemantauan seismik berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Panas bumi di Indonesia memiliki potensi besar untuk mencapai target ketangguhan energi dan pengurangan karbon, terutama dengan kemajuan teknologi geothermal baru. Namun, untuk mewujudkan



potensi penuhnya, diperlukan pendekatan yang hati-hati terhadap risiko lingkungan. Dampak lingkungan seperti pencemaran air tanah, emisi gas rumah kaca, kehilangan keanekaragaman hayati, induced seismicity, dan penurunan tanah perlu menjadi perhatian karena skalanya berbeda-beda di setiap lokasi. Risiko-risiko ini dapat meningkat di Indonesia jika pengembangan panas bumi dilakukan di dalam hutan konservasi, ekosistem yang dilindungi, dan zona vulkanik.

Untuk mencegahnya, pembuat kebijakan dan pengembang harus memprioritaskan penempatan sumber daya yang tepat, regulasi yang kuat, dan teknologi yang tangguh. (Untuk informasi lebih lanjut tentang topik ini, lihat Rekomendasi #9 di Bab 7, "Mengubah Potensi Menjadi Kekuatan: Cetak Biru Kebijakan untuk Transformasi Panas Bumi Indonesia.") Dengan menerapkan strategi dan perlindungan yang tepat, pengembang dapat meningkatkan produksi energi panas bumi tanpa mengorbankan hutan, air, dan komunitas lokal yang membuat Indonesia unik. Untuk Indonesia dengan kondisi lingkungannya yang unik, berikut ini beberapa rekomendasi untuk mengurangi risiko operasional panas bumi:

- Mendorong penerapan sistem geotermal generasi baru untuk pembangkit listrik panas bumi baru, serta untuk penggunaan pendinginan dan industri. Sistem geotermal generasi baru memiliki kelebihan karena beroperasi di area dengan permeabilitas terbatas di luar kawasan konservasi, sehingga akan mengurangi gangguan permukaan, penggunaan air, serta risiko bawah permukaan dan ekologi.
- Memprioritaskan pengembangan panas bumi di area berisiko rendah di luar kawasan hutan karena terdapat potensi lebih dari 2.160 gigawatt yang telah diidentifikasi di area ini (lihat Lampiran Bab 3, "Memperluas Cakupan: Peluang Pengembangan Geotermal Generasi Baru"), sembari memperkuat peraturan penggunaan lahan untuk menerapkan regulasi "no-go zones" bagi kawasan hutan dengan keanekaragaman hayati tinggi dan hutan konservasi. Teknologi panas bumi generasi baru berpotensi meningkatkan potensi panas bumi Indonesia secara signifikan.
- Semua pengembangan panas bumi harus mencakup persyaratan rehabilitasi lahan pasca operasi, termasuk reboisasi, stabilisasi lereng, dan pemulihan ekologi, terutama di daerah hutan atau pegunungan.
- Pengembang diwajibkan untuk memasang sistem pemantauan real-time di semua lokasi untuk memantau aktivitas seismik, penurunan tanah, emisi, dan kualitas air tanah, dilengkapi dengan pelaporan publik yang transparan.
- Pengolahan limbah panas bumi yang berkelanjutan harus diterapkan dengan memanfaatkan kembali limbah lumpur silika, lumpur pengeboran, dan produk sampingan lain yang bisa digunakan untuk kebutuhan konstruksi, pertanian, atau industri.
- Mengembangkan data dampak lingkungan panas bumi nasional yang dapat diakses oleh pengembang, investor, dan masyarakat umum untuk memantau penggunaan lahan, emisi, aktivitas seismik, dan dampak terhadap keanekaragaman hayati.
- Perlunya mengembangan pedoman yang jelas untuk melibatkan komunitas secara inklusif, memastikan bahwa masyarakat sekitar dan kelompok lokal dilibatkan secara aktif, dengan data yang tersedia secara public.

REFERENSI

1 Roque, P. J. C., Violanda, R. R., Bernido, C. C., & Soria, J. L. A. (2024). Earthquake occurrences in the Pacific Ring of Fire exhibit a collective stochastic memory for magnitudes, depths, and relative distances of events. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *637*, 129569. https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129569

2 Kajita, R., Yamanaka, M. D., & Kozan, O. (2022). Reconstruction of rainfall records at 24 observation stations in Sumatera, Colonial Indonesia, from 1879 to 1900. *Journal of Hydrometeorology, 23*(10), 1627–43. https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0245.1

3 Francis, P. W., & Wells, G. L. (1988). Landsat Thematic Mapper observations of debris avalanche deposits in the Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, *50*, 258–278. https://doi.org/10.1007/BF01047488

4 Karnawati, D. (2004). *Natural disasters of landslides in Indonesia and efforts to overcome them*. The Open University CORE. https://core.ac.uk/outputs/304769403/?source=oai

5 Chandra, V. R., Purba, D. P., Nayoan, A. G. P., Fadhillah, F. R., Ramadhan, R. F., &. Anggara, R. (2021). Identifying and assessing geohazards in Indonesia geothermal area: How difficult is it? In *Proceedings of the 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2021/Chandra4.pdf

6 Zaennudin, A. (2010). The characteristic eruption of Indonesian active volcanoes in the last four decades. *Journal of Environment and Geological Hazards*, *1*(2), 113–129. https://scispace.com/pdf/the-characteristic-of-eruption-of-indonesian-active-24aiyl8qdi.pdf

7 Chandra et al., 2021.

8 Habibi, A. H., Perdana, T. S. P., Purwanto, E. H., & Setiawan, H. (2023). Geothermal business outlook in Indonesia. In *Proceedings of the 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2023/Habibi.pdf

9 Convention on Biological Diversity. (n.d.). *Indonesia–country profile*. https://www.cbd.int/countries/profile?country=id

10 Government of Indonesia. (2022). *Indonesian Biodiversity Strategy and Action Plan (IBSAP) 2025-2045*. https://lcdi-indonesia.id/wp-content/uploads/2025/02/IBSAP-2025-2045.pdf

11 Convention on Biological Diversity, n.d.

12 Global Forest Watch. (2023). *Forest loss*. https://www.globalforestwatch.org/dashboards/global/?category=forest-change&location=WyJnbG9iYWwiXQ%3D%3D&scrollTo=forest-loss

13 Maulana, B. (2024, July 4). *Geothermal heat and threats to Indonesia's forests*. Mongabay. https://mongabay.co.id/2024/07/04/panas-bumi-dan-ancaman-hutan-indonesia/

14 Meijaard, E., Dennis, R. A., Saputra, B. K., Draugelis, G. J., Qadir, M. C. A., & Garnier, S. (2019). *Rapid environmental and social assessment of geothermal power development in conservation forest areas of Indonesia*. PROFOR and World Bank. https://www.profor.info/sites/default/files/PROFOR_Geothermal%20Indonesia%20Report%20-%20August%202019_0.pdf

15 Lovering, J., Swain, M., Blomqvist, L., & Hernandez, R. R. (2022). *Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape. PLOS ONE*, *17*(7), e0270155. https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371%2Fjournal.pone.0270155

16 Personal communications, Reza Sohrabi, Groupe Griosni, November 3, 2025.

17 Grimes, J., & Nelson, D. (Eds.). (2025). *The future of geothermal in New Mexico: A land of geothermal enchantment*. Project InnerSpace. https://projectinnerspace.org/resources/Future-of-Geothermal-in-New-Mexico.pdf

18 Meijaard et al., 2019.

19 Meijaard et al., 2019.

20 Kristmannsdóttir, H., & Ármannsson, H. (2003). Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics*, *32*(4–6), 451–461. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037565050300052X

21 Costa Rican Institute of Electricity (ICE). (2020). *Costa Rica: Geothermal energy: Its own sustainability model.* https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/1668af4e-c6df-45de-a386-464e147d8705/GEOTERMIA_EN_PEQ.pdf?MOD=AJPERES

22 Think Geoenergy. (2021). *Costa Rica geothermal energy market overview.* https://www.thinkgeoenergy.com/wp-content/uploads/2021/05/Costa-Rica-short.pdf

23 DiPippo, R. (2013). *Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact* (3rd ed.). Elsevier. https://www.sciencedirect.com/book/9780080982069/geothermal-power-plants

24 International Energy Agency (IEA). (2011). *Technology roadmap: Geothermal heat and power.* https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-geothermal-heat-and-power

25 Fridriksson, T., Mateos, A., Audinet, P., & Orucu, Y. (2016). *Greenhouse gases from geothermal power production*. World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/99ca96a7-6ce4-5cf7-b720-aa1597e2859c

26 Soltani, M., Kashkooli, F. M., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K., & Nathwani, J. S. (2021). Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *140*, 110750. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750

27 Johnson, A., Mäkinen, A., Fahim, S., & Arevalo, Y. (2022). *Quantification of our carbon footprint while drilling*. IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, TX, United States. https://doi.org/10.2118/208737-ms

28 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *AR6 climate change 2022: Mitigation of climate change*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/

29 Asian Development Bank. (2018). *Indonesia: Geothermal investment and risk mitigation project—Climate change assessment*. https://www.adb.org/sites/default/files/linked-documents/52282-002-cca.pdf

30 DiPippo, 2012.

31 Fridriksson et al., 2016.



32 DiPippo, 2012.
33 Clark, C. E., Harto, C. B., Sullivan, J. L., & Wang, M. Q. (2010). *Water use in the development and operation of geothermal power plants*. Argonne National Laboratory. https://publications.anl.gov/anlpubs/2010/09/67934.pdf
34 Baker, E., & McKenzie, R. (2021). Environmental and social impacts of geothermal development in protected areas. *Journal of Energy and Development*, *46*(1), 55–73.
35 Saptadi, D., Setiawan, H., & Nugraha, A. (2020). Geothermal development and watershed protection in Indonesia. *Renewable Energy Policy Journal*, *8*(2), 120–135.
36 Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003.
37 IEA, 2011.
38 Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26*, 446–463. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113003420
39 Massachusetts Institute of Technology. (2006). *The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century*. https://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/future_geo_energy.pdf
40 Audit Board of Indonesia. (2008). *Waste management law No. 18/2008*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/39067/uu-no-18-tahun-2008
41 Gerardi, G., Dublanchet, P., Jeannin, L., Kazantsev, A., Duboeuf, L., Ramadhan, I., Azis, H., Ganefianto, N., & Nugroho, I. A. (2024). Geomechanical modelling of injection-induced seismicity: The case study of the Muara Laboh geothermal plant. *Geophysical Journal International*, *237*(2), 818–837. https://doi.org/10.1093/gji/ggae084
42 Sianipar, D., Sipayung, R., & Ulfiana, E. (2020). Excessive seismicity over a limited source: The August 2019 earthquake swarm near Mt. Salak, Indonesia. *Journal of Seismology*, *24*(6), 1235–1247. https://link.springer.com/article/10.1007/s10950-020-09957-w
43 Pramono, B., & Colombo, D. (2005). Microearthquake characteristics in Darajat geothermal field, Indonesia. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*. International Geothermal Association. https://www.researchgate.net/publication/266877543_Microearthquake_Characteristics_in_Darajat_Geothermal_Field_Indonesia
44 Audit Board of Indonesia. (2014). *Geothermal law No. 21/2014, article 52*. Government of Indonesia. https://peraturan.bpk.go.id/Details/38684/uu-no-21-tahun-2014
45 Zhou, W., Lanza, F., Grigoratos, I., Schultz, R., Cousse, J., Trutnevyte, E., Muntendam-Bos, A., & Wiemer, S. (2024). Managing induced seismicity risks from enhanced geothermal systems: A good practice guideline. *Reviews of Geophysics*, *62*(4), e2024RG000849. https://doi.org/10.1029/2024RG000849
46 Dorbath, L., Cuenot, N., Genter, A., & Frogneux, M. (2009). Seismic response of the fractured and faulted granite of Soultz-sous-Forêts (France) to 5 km deep massive water injections. *Geophysical Journal International*, *177*(2), 653–675. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04030.x
47 Kwiatek, G., Saarno, T., Ader, T., Bluemle, F., Bonhoff, M., Chendorain, M., Dresen, G., Heikkinen, P., Kukkonen, I., Leary, P., Leonhardt, M., Malin, P., Martínez-Garzón, P., Passmore, K., Passmore, P., Valenzuela, S., & Wollin, C. (2019). Controlling fluid-induced seismicity during a 6.1-km-deep geothermal stimulation in Finland. *Science Advances*, *5*(5), eaav7224. https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7224
48 Koirala, R., Kwiatek, G., Shirzaei, M., Brodsky, E., Cladouhos, T., Swyer, M., & Goebel, T. (2024). Induced seismicity and surface deformation associated with long-term and abrupt geothermal operations in Blue Mountain, Nevada. *Earth and Planetary Science Letters*, *643*, 118883. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118883
49 Norbeck, J., & Latimer, T. (2023). *Commercial-scale demonstration of a first-of-a-kind enhanced geothermal system*. EarthArXiv (California Digital Library). https://doi.org/10.31223/x52x0b

50 Moore, J., McLennan, J., Allis, R., Pankow, K., Simmons, S., Podgorney, R., Wannamaker, P., Bartley, J., Jones, C., & Rickard, W. (2019). The Utah Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE): An international laboratory for enhanced geothermal system technology development. In *Proceedings, 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2019/Moore.pdf

51 World Bank. (2019). *Geothermal Energy Upstream Development Program (GEUDP): Waesano Geothermal Project: Environmental and social impact assessment (ESIA).* World Bank. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/262681556011595144/environmental-and-social-impact-assessment-for-waesano-geothermal-project

52 Star Energy. (2023). *Star Energy Geothermal (Wayang Windu) limited annual green bond report*. https://www.starenergygeothermal.co.id/wp-content/uploads/2023/09/2023-Annual-Green-Bond-Report-of-Star-Energy-Geothermal-Wayang-Windu-sent.pdf#:~:text=Facility%20CO2%20emission%20%28g%2FKWh%29%2065,31

53 Ministry of Energy and Mineral Resources. (2010). *Ministerial regulation No. 19/2010 on environmental management for geothermal development*. Government of Indonesia.

54 Pertamina Geothermal Energy (PGE). (2022). *Energizing green energy: Endless commitment to actualize the sustainable energy transition*. https://www.pge.pertamina.com/Media/Uploads/keberlanjutan/file/Book%2520PGE%25202022-R13-Final-English-Small.pdf&sa=D&source=docs&ust=1762790002547025&usg=AOvVaw1RVG8SOjM-pE2uiEwBVoXj

55 Kristiningrum, D., Nugroho, M. A., & Widodo, S. (2020). Modeling H_2S emissions and abatement strategies in geothermal fields. *Journal of Environmental Science and Engineering*, *14*(3), 45–53.

56 Hutapea, R., Simamora, S., & Setiawan, H. (2019). Hydrogen sulfide monitoring in Sarulla geothermal field. *Geothermal Resources Council Transactions*, *43*, 581–588.

57 Nugroho, M. A., et al. (2020). Comparative air emissions from fossil and geothermal power plants in Indonesia. *Energy Policy Journal*, 18(2), 122–131.

58 Kristiningrum et al., 2020.

59 Ministry of Environment and Forestry. (2019). *Government regulation no. 41/1999 on air pollution control*. Government of Indonesia.

60 Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2012). *Hydrogen sulfide: Hazard recognition and standards*. U.S. Department of Labor. https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide/standards

61 Eberle, A., Heath, G., Nicholson, S., & Carpenter, A. (2017). *Systematic review of life cycle greenhouse gas emissions from geothermal electricity*. National Renewable Energy Laboratory. https://docs.nrel.gov/docs/fy17osti/68474.pdf

62 Boundless Impact Research & Analytics. (2021). *Eavor climate impact profile: Geothermal energy industry*. https://www.eavor.com/wp-content/uploads/2021/08/Boundless-Report-Eavor-Impact-Profile_Shareable-version-Final.pdf

63 Ea Energy Analyses. (2024). *Technology data for the Indonesian Power Sector 2024: Catalogue for generation and storage of electricity*. https://www.ea-energianalyse.dk/wp-content/uploads/2025/05/technology-data-for-the-indonesian-power-sector-2024.pdf

64 World Bank, 2019.

65 Utami, A., Aji, N., Fadyah, A., Ghifari, A., Anam, M. B., Ramadhani, S., Rasyid, F. H., & Maulana, R. R. (2020). Geothermal energy solid waste management: Source, type of waste, and the management. *AIP Conference Proceedings*, *2245*(1), 060001. https://doi.org/10.1063/5.0007299

66 Papakostas, V., Paravantis, J. A., Kontoulis, N., Velmurugan, N., & Cazenave, F. (2023). Assessing the environmental impacts of deep geothermal drilling in the ORCHYD Project. In *Proceedings, World Geothermal Congress 2023*. Beijing, China. https://www.researchgate.net/publication/378355082_Assessing_the_Environmental_Impacts_of_Deep_Geothermal_Drilling_in_the_ORCHYD_Project



67 Zhou, J., Chen, S., & Das, A. K. (2025). Application of sludge as sustainable material in building materials: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, *111*, 113434. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113434

68 Xia, Y., Liu, Y., Wang, L., Song, Z., Sun, C., Zhao, Y., Lu, S., & Yan, J. (2023). Value-added recycling of sludge and sludge ash into low-carbon construction materials: Current status and perspectives. *Low-carbon Materials and Green Construction*, *1*, 23. https://doi.org/10.1007/s44242-023-00023-5

69 Utami et al., 2020.

70 Kaczmarczyk, M., Sowiżdżał, A., & Tomaszewska, B. (2024). Life cycle and water footprint assessment in the geothermal energy sector. *Energies*, *17*(23), 6050. https://doi.org/10.3390/en17236050

71 Utami et al., 2020.

72 Shortall, R., Davidsdottir, B., & Axelsson, G. (2015). Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 391-406. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.020



73 Allis, R. G. (2000). Review of subsidence at Wairakei field, New Zealand. *Geothermics*, *29*(4–5), 455–478. https://doi.org/10.1016/S0375-6505(00)00016-X

74 Gambolati, G., & Teatini, P. (2015). Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection. *Water Resources Research*, *51*(6), 3922–3955. https://doi.org/10.1002/2014WR016841

75 Zaenudin, A., Putra Sofiyadin, I. T., & Arief, R. (2020). Delineation of subsidence in the alteration zone in Ulubelu geothermal field based on interferometry synthetic aperture radar time series. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, *6*(3), 190–196. https://doi.org/10.23960/jge.v6i3.76

76 Khakim, M. Y. N., Tsuji, T., Erni, Bama, A. A., Virgo, F., Irfan, M., Affandi, A. K., & Matsuoka, T. (2023). Monitoring the Muara Laboh geothermal field in Indonesia using the ISBAS method with Sentinel-1 SAR images. *Science and Technology Indonesia*, *8*(4), 626–631. https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.4.626-631

77 Allis, R., Bromley, C., & Currie, S. (2009). Update on subsidence at the Wairakei–Tauhara geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, *38*(1), 169–180. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.12.006

78 Mannington, W. I., O'Sullivan, M. J., Bullivant, D. P., & Clotworthy, A. W. (2004). Reinjection at Wairakei–Tauhara: A modelling case study. In *Proceedings of the 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2004/Mannington.pdf

79 Mellors, R. J., Xu, X., Matzel, E., Sandwell, D., & Fu, P. (2018). New potential of InSAR for geothermal systems. In *Proceedings of the 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2018/Mellors1.pdf

80 Wang, Z., Lv, B., Li, J., & Yin, S. (2024). Geothermal energy extraction–induced ground movement monitoring by InSAR and its implication for reservoir management. *Journal of Energy Engineering*, *150*(5), 04024029. https://doi.org/10.1061/JLEED9.EYENG-5523

81 PT Supreme Energy Muara Laboh. (2024). *Draft initial environmental examination: Indonesia: Muara Laboh Geothermal Power Project—Stage 2, Part 1*. Asian Development Bank. https://www.adb.org/sites/default/files/project-documents/57311/57311-001-iee-en.pdf

82 World Health Organization. (2018). *Environmental noise guidelines for the European region*. WHO Regional Office for Europe. https://www.who.int/publications/i/item/9789289053563

83 Ministry of Environment. (1996). *Decree of the State Minister for the Environment No. 48/MENLH/11/1996 concerning noise level standards*. Government of Indonesia.

84 Gerardi et al., 2024.

85 CELIOS-WALHI. (2024). *Indonesia's geothermal challenge: Amidst potential and exploitation in the name of energy transition*. https://www.walhi.or.id/uploads/buku/EN%20CELIOS%20x%20WALHI%20Geothermal%202024.pdf

86 Mustika, A. I., Permadi, G. B., Shalihin, M. G. J., Nugraha, R. P., Pratama, A. R., Purwanto, E. H., & Nazif, H. (2023). Discovering the potential of unconventional geothermal systems in Indonesia. In *Proceedings of the 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2023/Mustika.pdf

87 Mustika, A. I., Larasati, T., Pratama, A. R., Jazmi, M. G., Ferdino, R. F., & Serina, A. P. (2024). The study of supercritical geothermal potential in Indonesia from geoscience perspective. In *Proceedings of the 49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, United States. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2024/Mustika.pdf