



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



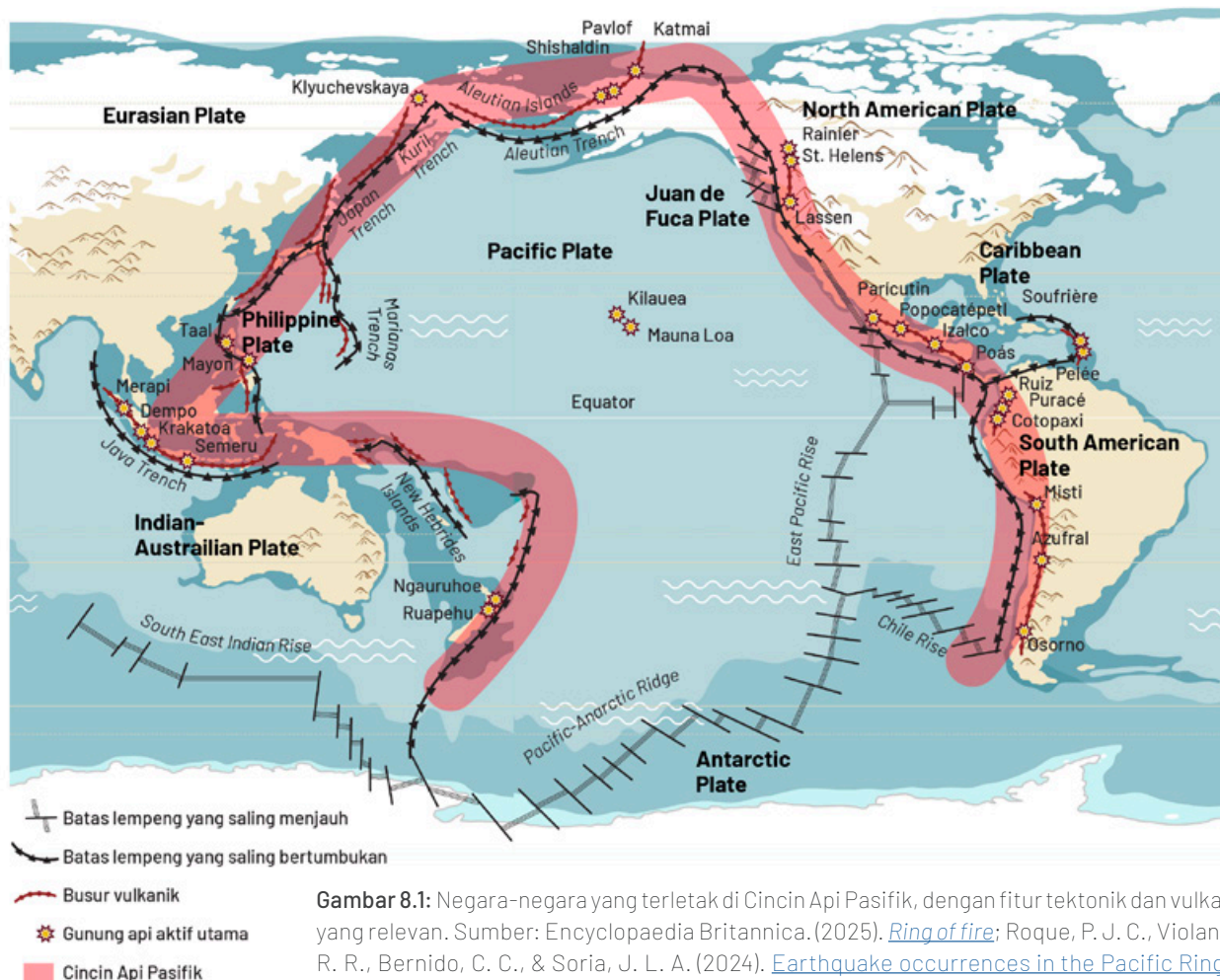
pendingin kawasan untuk kota-kota yang mengalami panas ekstrem; jaringan panas bumi untuk rumah sakit dan kampus; serta panas geotermal untuk pemanfaatan langsung dalam pengolahan makanan, tekstil, pulp dan kertas, serta farmasi. Fasilitas-fasilitas ini jauh lebih kecil daripada pembangkit listrik skala 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

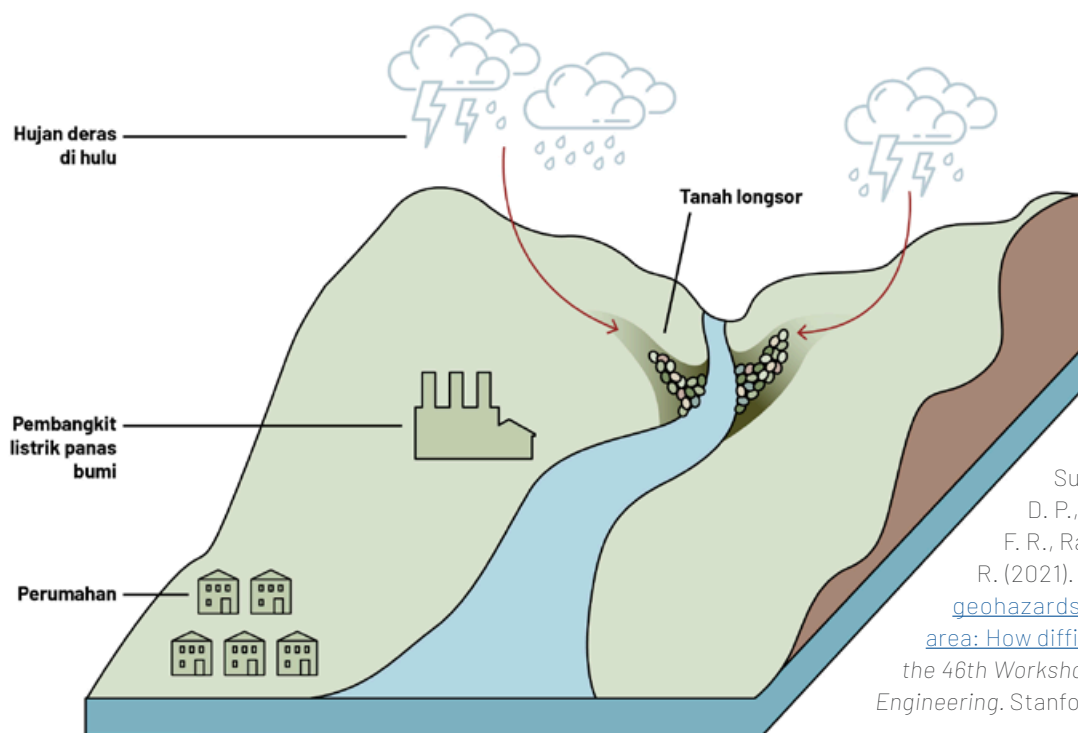
Kondisi Geografi dan Aktivitas Vulkanik

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}

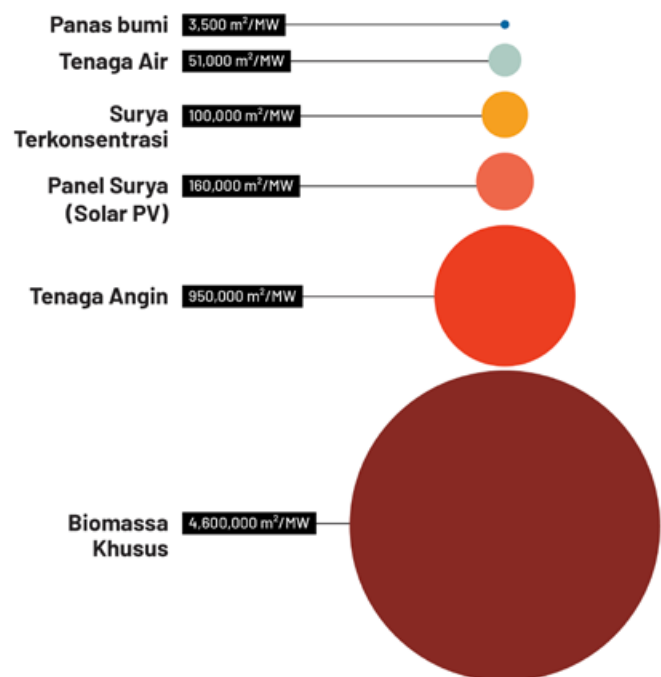
KEANEKARAGAMAN HAYATI DAN EKOSISTEM

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

MEMBANDINGKAN JEJAK PERMUKAAN



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.

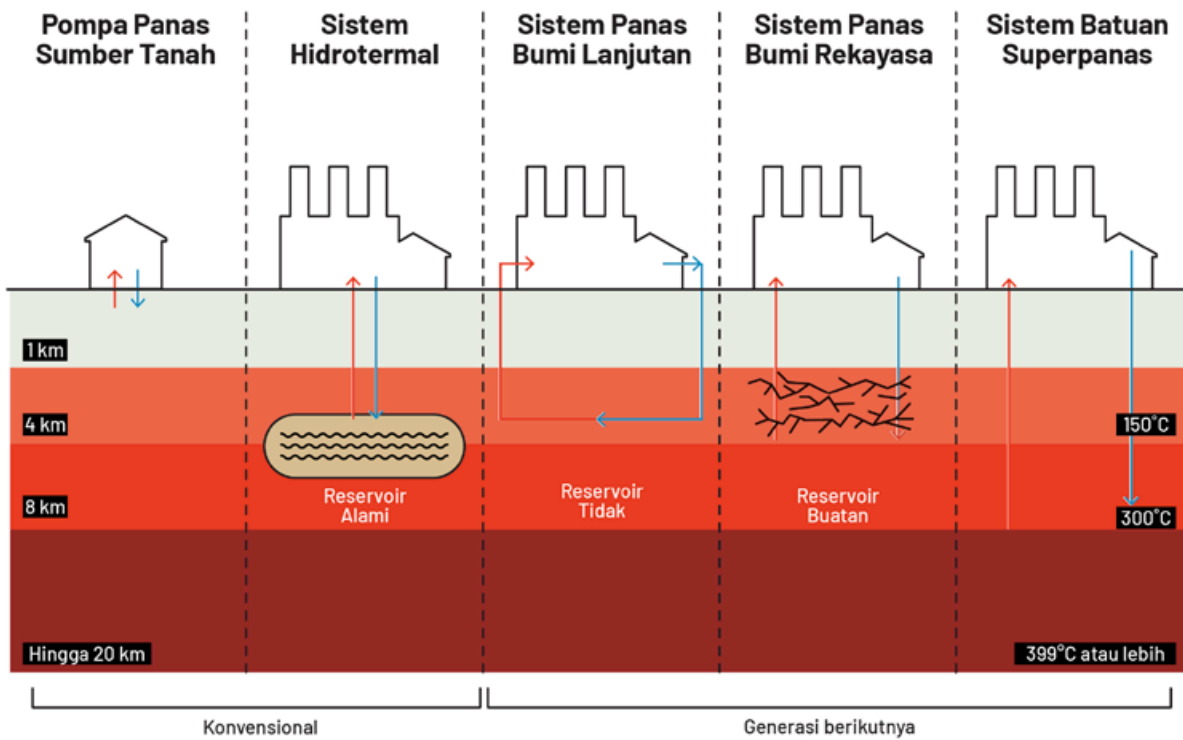
Catatan penting lain adalah bahwa seiring dengan perluasan pengembangan sumber daya panas bumi yang melimpah di Indonesia, teknologi panas bumi generasi baru akan memungkinkan pengembang untuk fokus pada wilayah yang memiliki risiko banjir dan tanah tidak stabil yang lebih rendah, yang umumnya ditemukan 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 EKSPLOKASI 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

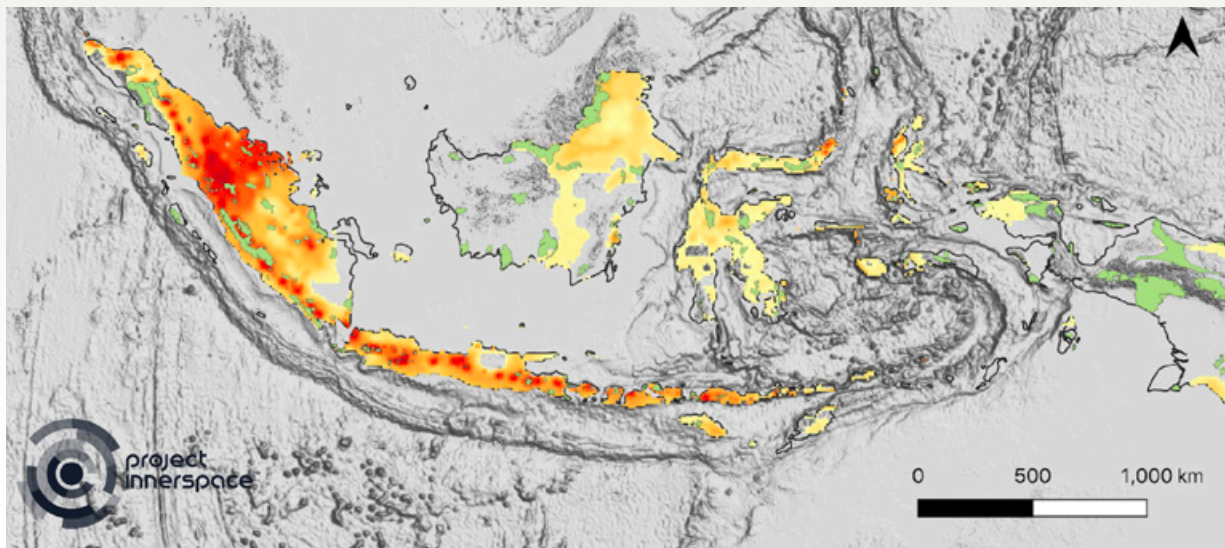
Fase konstruksi pembangkit listrik adalah fase yang paling berdampak, sekaligus yang paling berisiko. Pembangkit listrik memerlukan permukaan yang luas untuk instalasi infrastruktur, seperti landasan pengeboran, sumur produksi dan injeksi, pipa, serta pembangkit listrik itu sendiri. Meskipun pembangkit 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 dilakukan 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



PJ/km² pada kedalaman 3.000 meter dengan batas suhu 150°C



 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 eksplorasi 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.

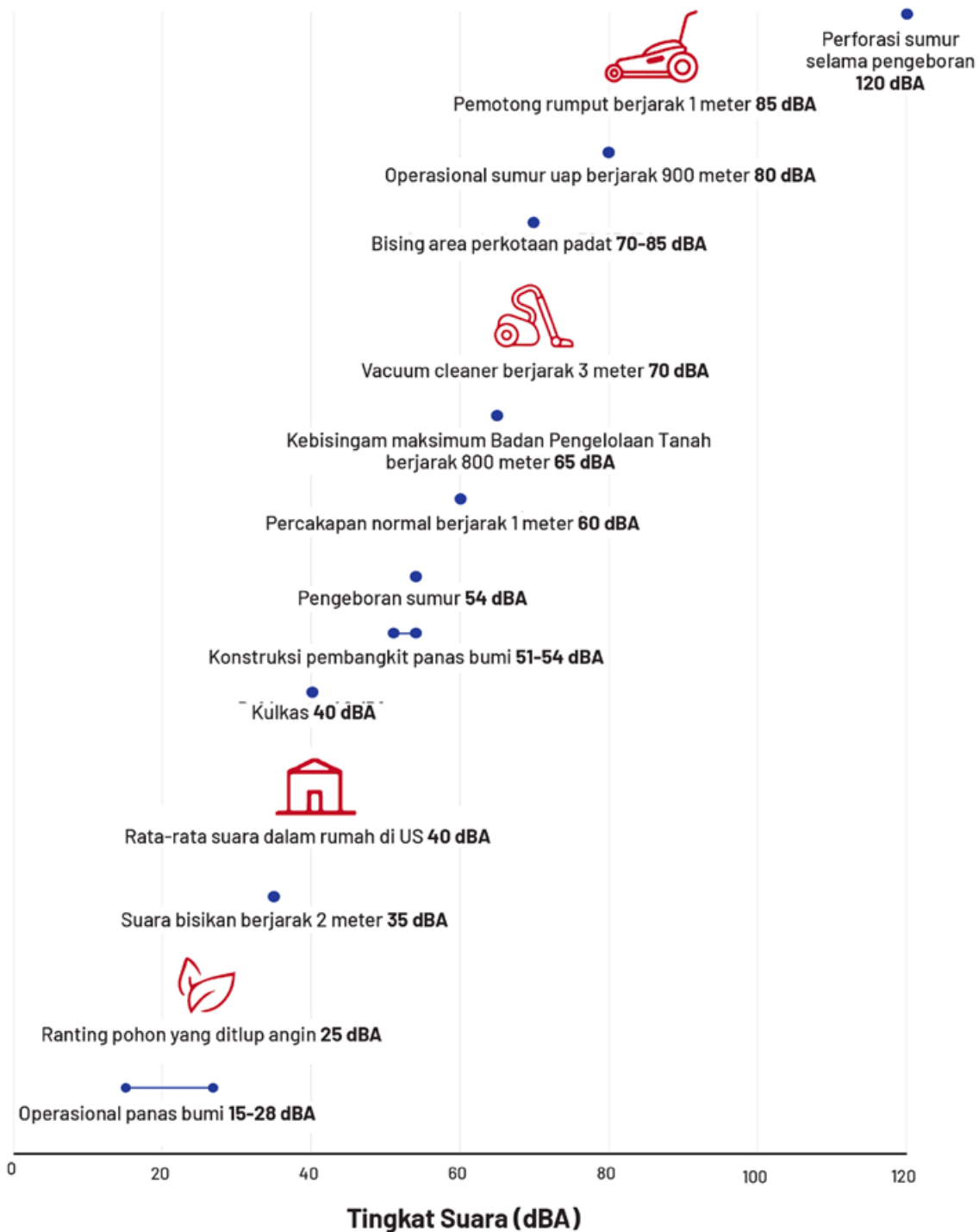
Polusi Suara

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 ₂ e/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 mengalirkan 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 CO₂-ekuivalen per kilowatt-jam untuk pembangkit EGS⁶¹ dan 11,6 gram CO₂-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
		Penggunaan 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-ekuivalen 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 $-0.5 \leq$ 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 mengembangkan 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/journal.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%20C02%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&usq=A0vVaw1RVG8SOjM-pE2uiEwBVoXj>
- 55 Kristiningrum, D., Nugroho, M. A., & Widodo, S. (2020). Modeling H₂S 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.jobbe.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., Sowizdżał, 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](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/JLEFD9.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>

