



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.

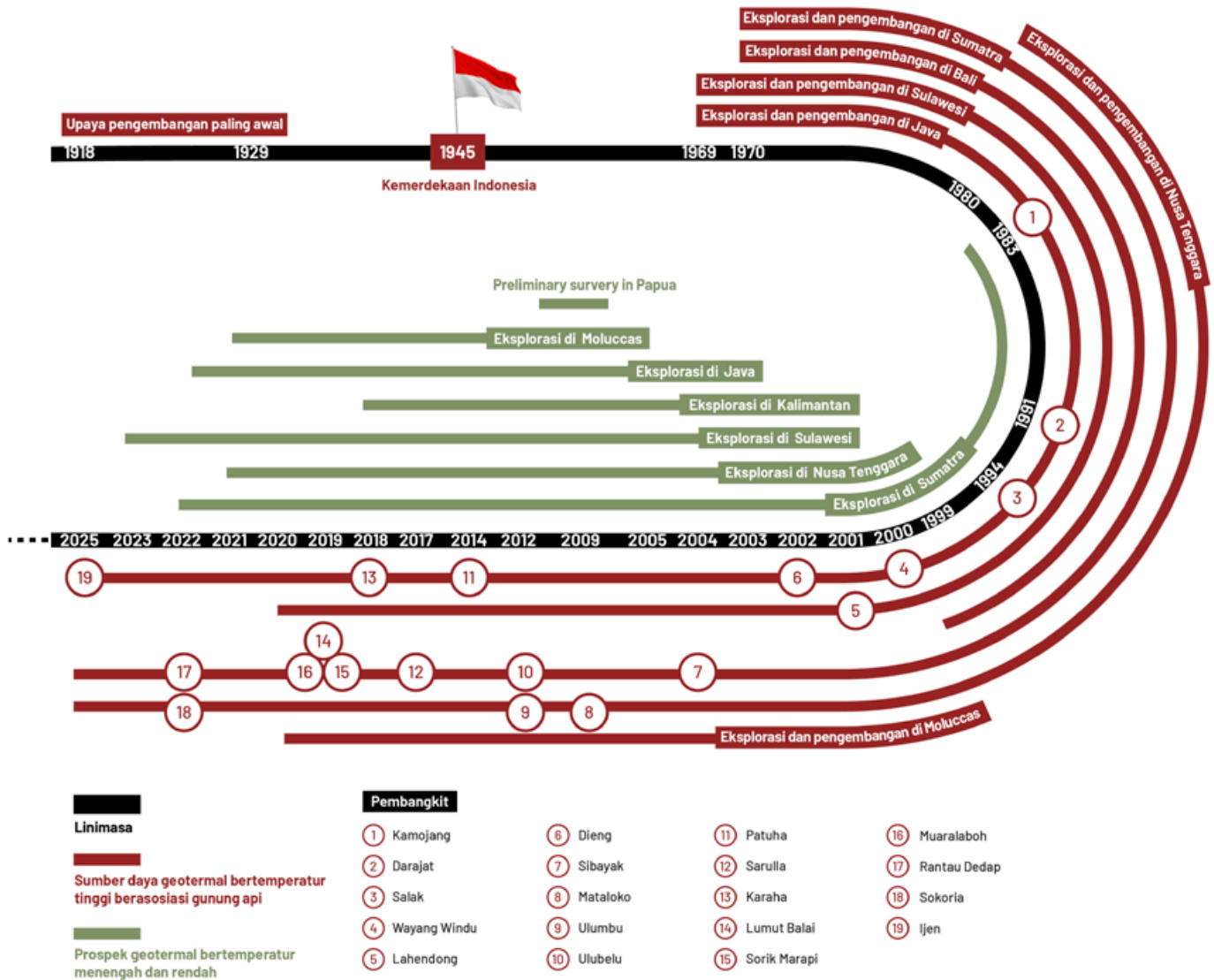
Upaya awal untuk mengembangkan sumber daya panas bumi Nusantara dilakukan oleh pemerintah kolonial Belanda, yang mulai mengeksplorasi area fumarola di Kamojang (Jawa Barat) pada tahun 1918¹. Setelah kemerdekaan pada tahun 1945, Indonesia mulai mengeksplorasi potensi geotermal di seluruh

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 listrik⁵. 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 2025⁶. Estimasi tersebut mencakup sumber daya spekulatif, hipotetik, hingga cadangan terbukti, terutama dalam sistem geotermal hidrotermal.

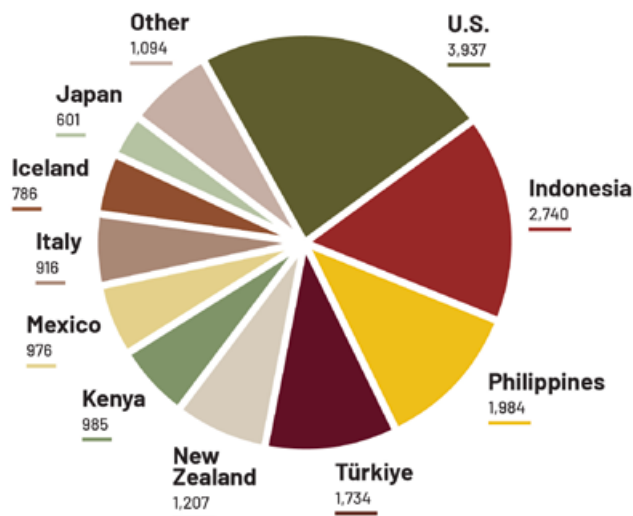
Pembahasan mengenai sumber daya tambahan yang dapat dikembangkan melalui teknologi geotermal generasi berikutnya disajikan dalam, Bagian 2, Memperluas Cakupan: Peluang Pengembangan Geotermal Generasi Baru pada bab ini.

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*

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.

Level/TRL) untuk masing-masing sistem geotermal.

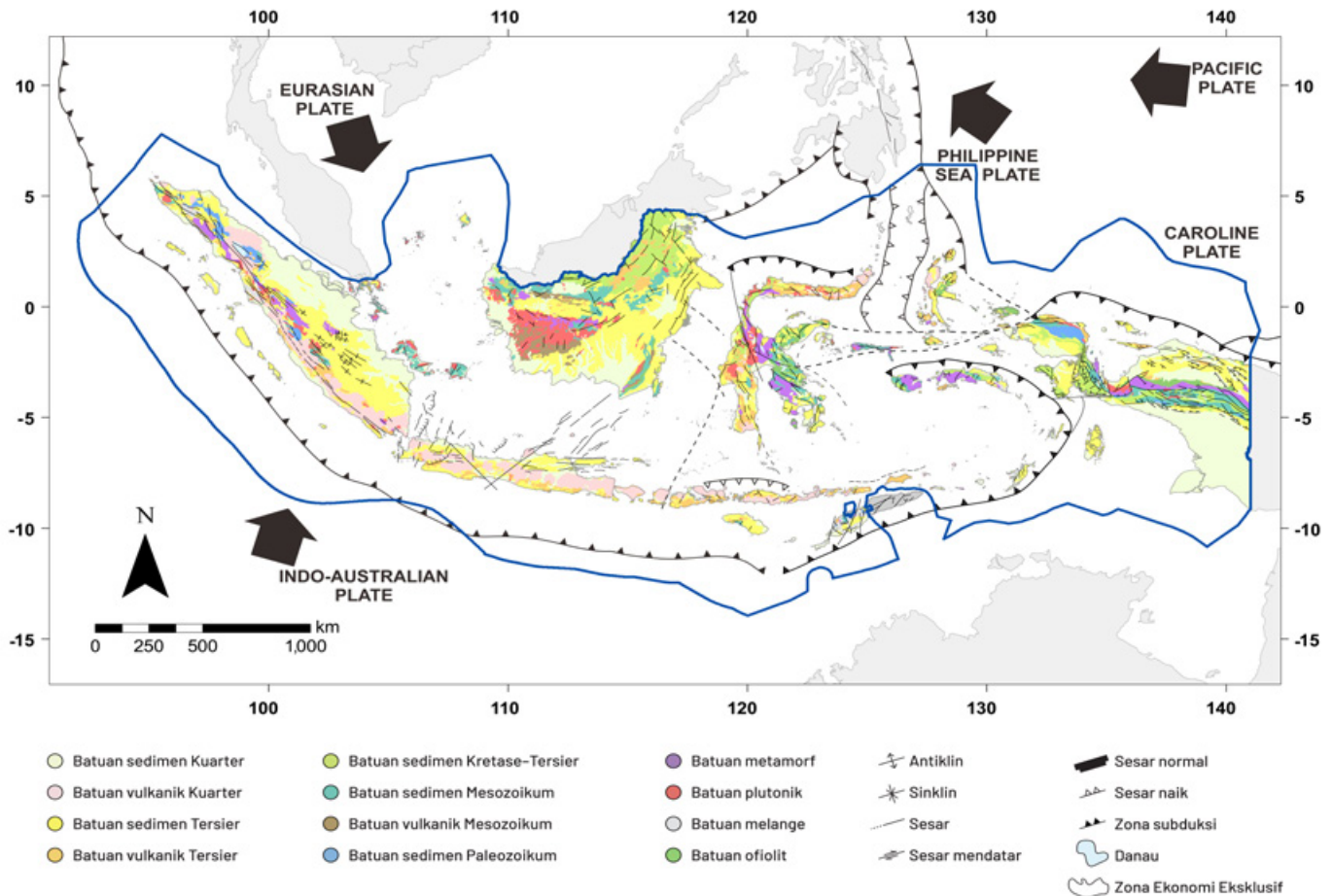
GEOLOGI INDONESIA SECARA RINGKAS

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 benua⁹.



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). *Geochemical 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](https://www.marine-registry.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

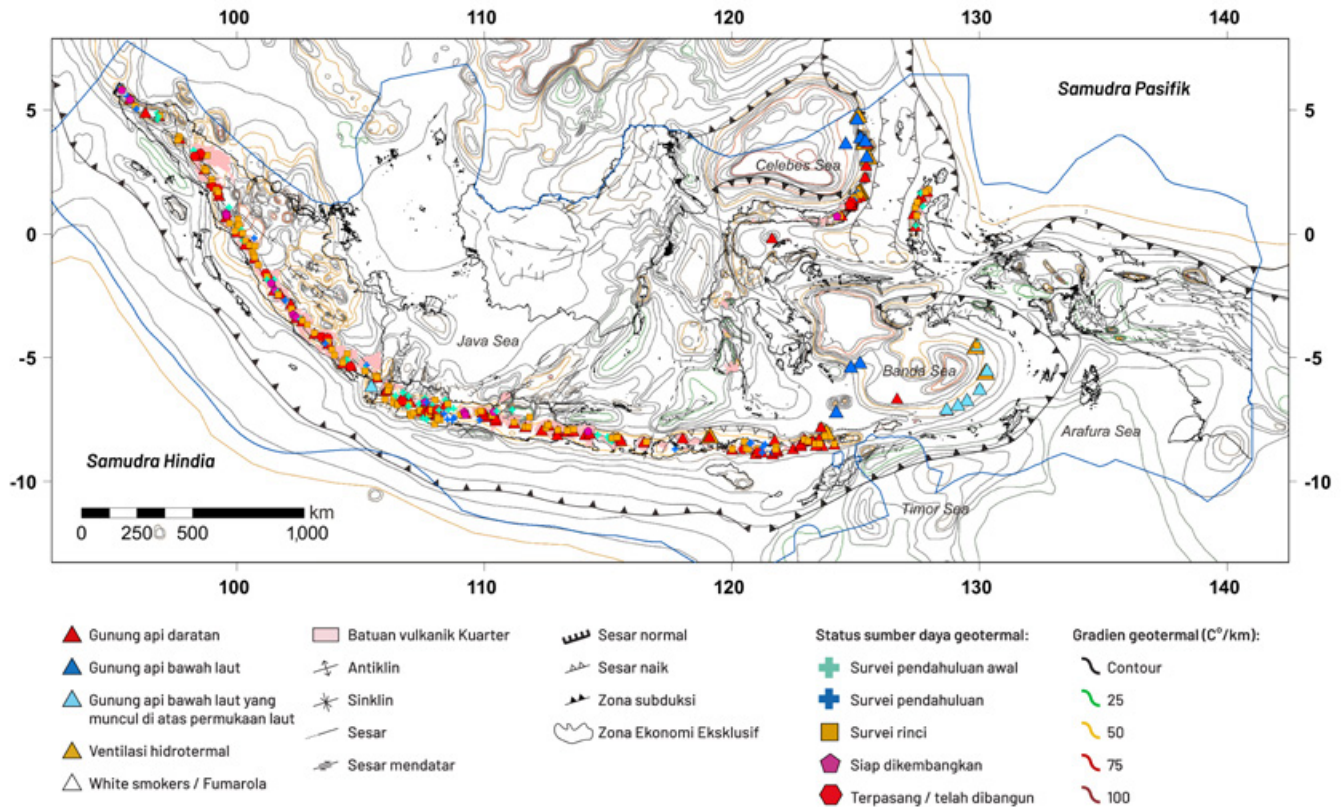
Gambar 3.4: Ringkasan jenis-jenis sumber daya geotermal di Indonesia. Sumber: penulis, berdasarkan informasi yang disajikan dalam Bab 2.

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



INDIKATOR POTENSI GEOTERMAL DI INDONESIA



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 Kuartar (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

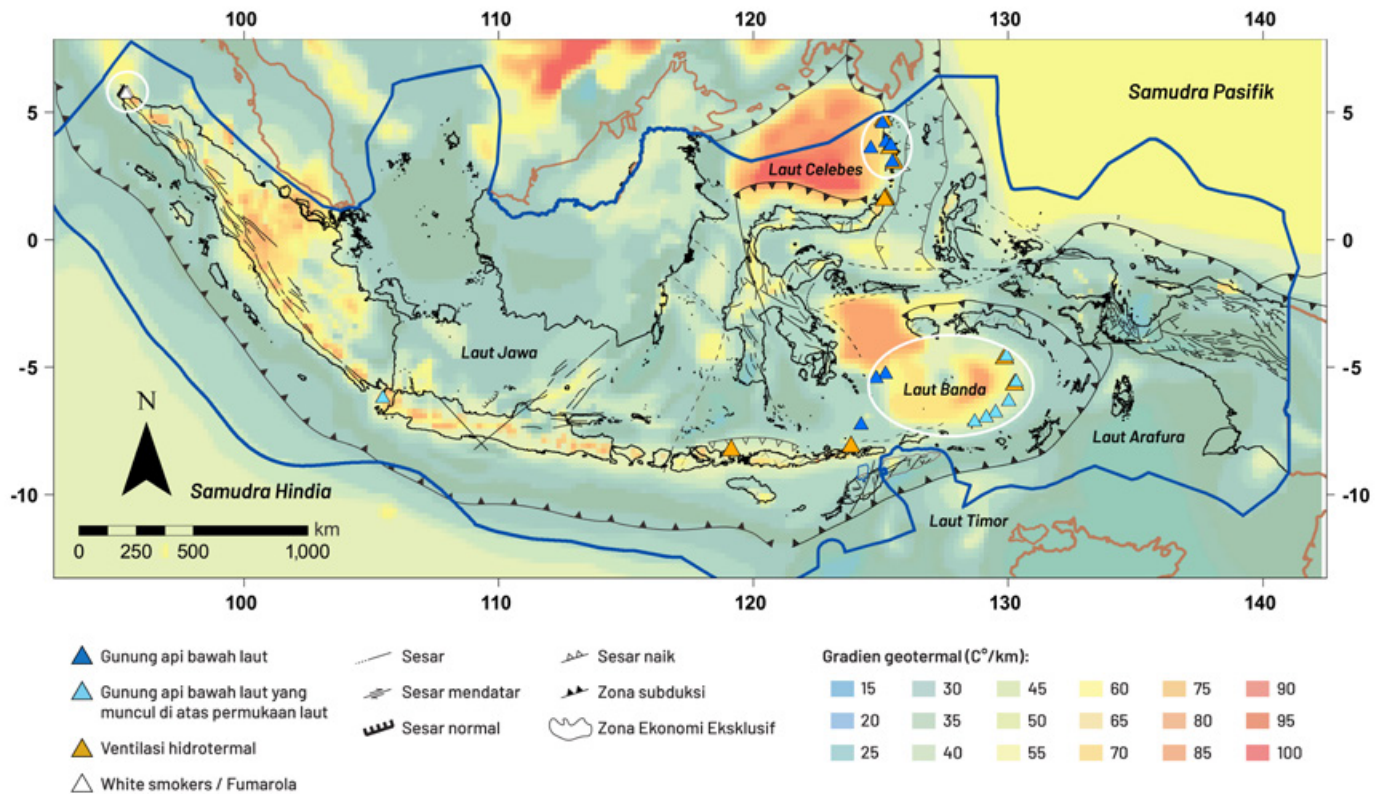
Sumber daya geotermal bawah laut menyimpan energi yang sangat besar dan belum dimanfaatkan, dengan potensi signifikan untuk menyediakan pasokan energi berkelanjutan. Sistem geotermal hidrotermal yang berasosiasi dengan gunung api bawah laut memiliki karakteristik yang serupa dengan sistem di daratan, 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; Sukanto 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.

- 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.
- 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} Jepang²⁵, and



California²⁶— 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 temperatur²⁸ 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.

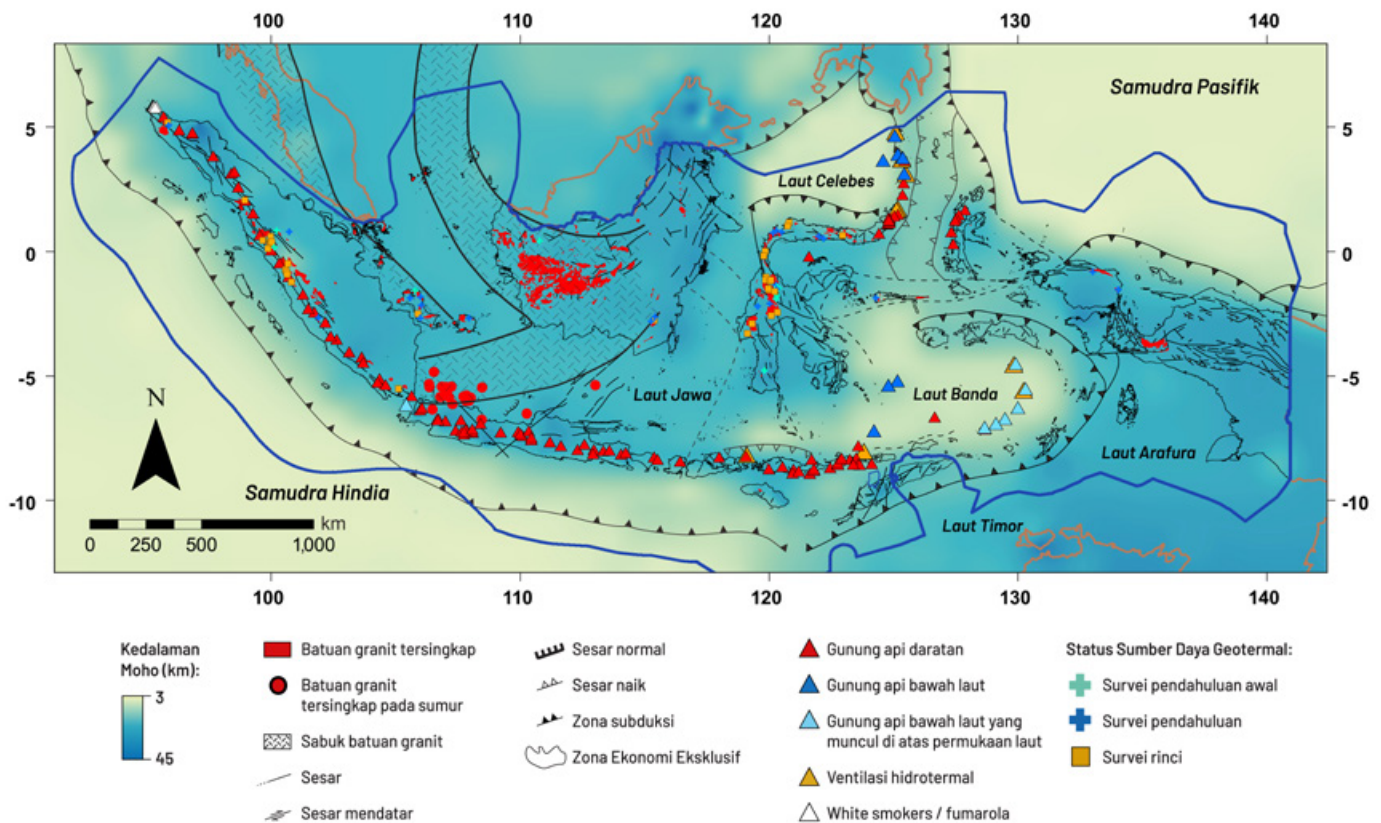
Sumber Daya Geotermal Radiogenik Berasosiasi Batuan Granit: Hidrotermal dan *Hot Dry Rock* (HDR) (Daratan dan Bawah Laut)

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

BATU KETAK PANTAI, BANGKA PULAU



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

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.

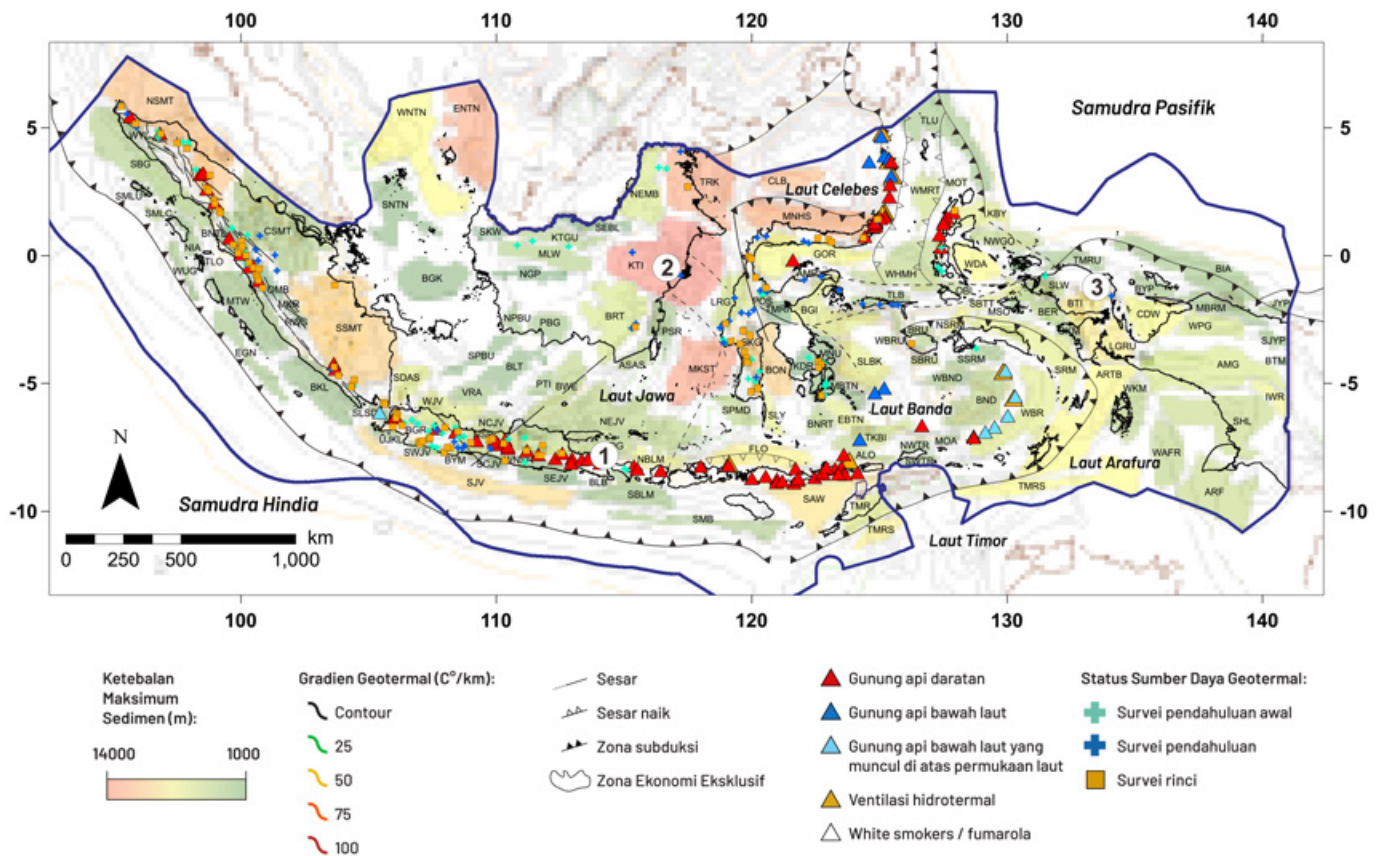
Secara keseluruhan, sistem geotermal berasosiasi batuan granit di Indonesia—baik hidrotermal maupun HDR—merupakan sumber daya yang prospektif dan semakin mendapat perhatian. Investasi strategis dalam eksplorasi, penilaian sumber daya, dan teknologi pendukung dapat mempercepat pengembangan sistem ini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

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.



CEKUNGAN SEDIMEN DAN FITUR GEOTERMAL



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.

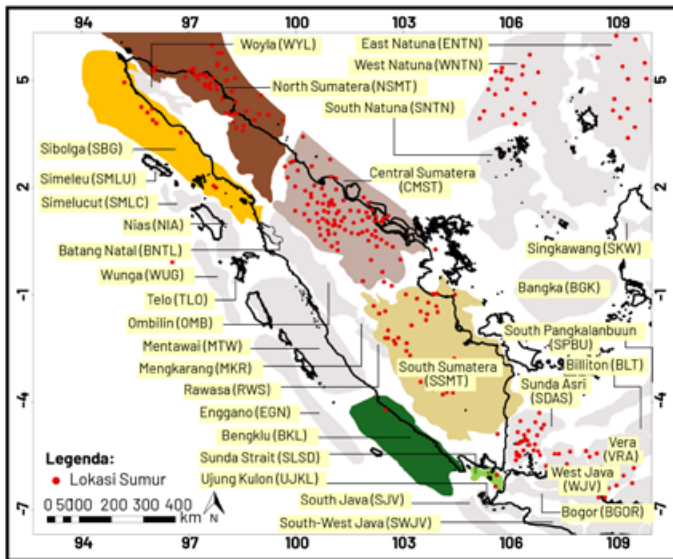
SHGR yang dipengaruhi aktivitas magmatik ditandai oleh temperatur yang tinggi akibat kedekatan dengan sumber panas magmatik. Pengaruh ini sering terdeteksi melalui komposisi gas, khususnya kadar karbon dioksida anorganik yang meningkat (hasil degassing magma) serta metana (berasal dari aktivitas mikroba 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

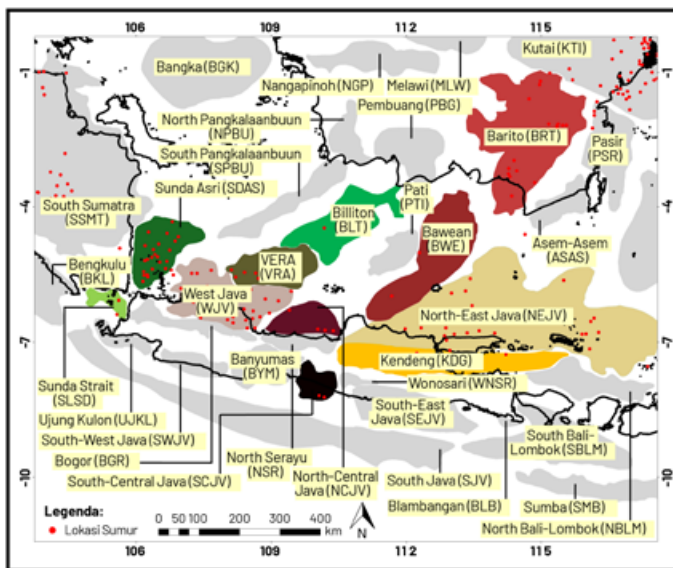
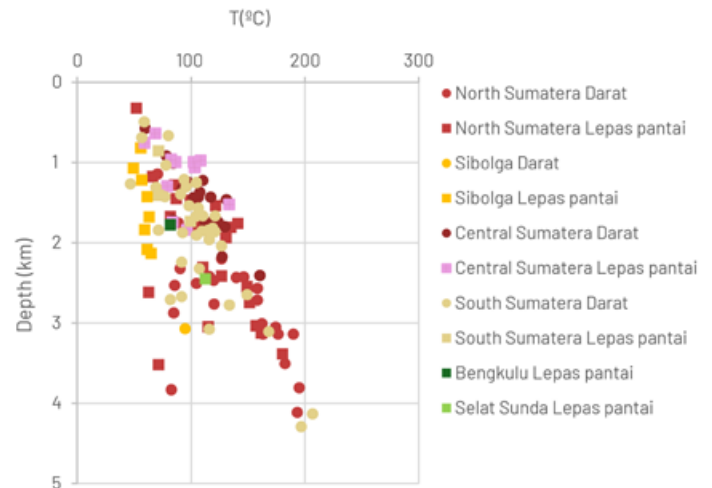
dengan busur magmatik aktif. Manifestasi permukaan telah diamati di beberapa lokasi, meskipun belum ada SHGR yang secara formal diklasifikasikan sebagai dipengaruhi aktivitas magmatik. Erupsi lumpur Lusi di Jawa Timur merupakan contoh interaksi mendalam antara proses magmatik dan sedimen. Pembentukan 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.



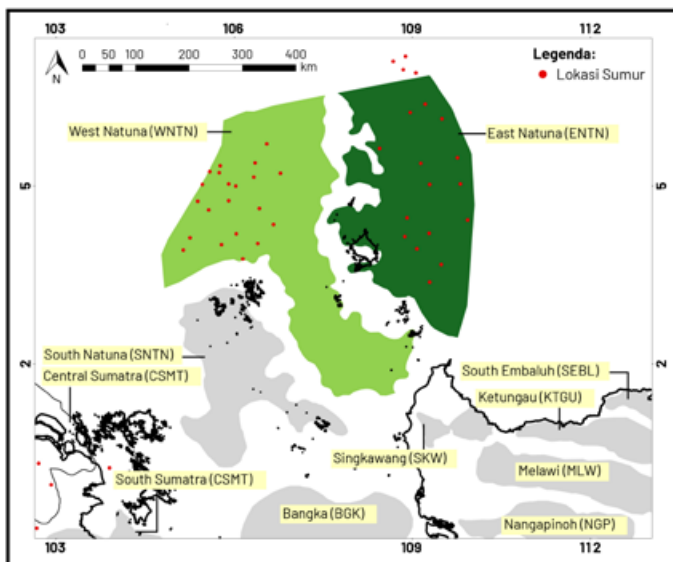
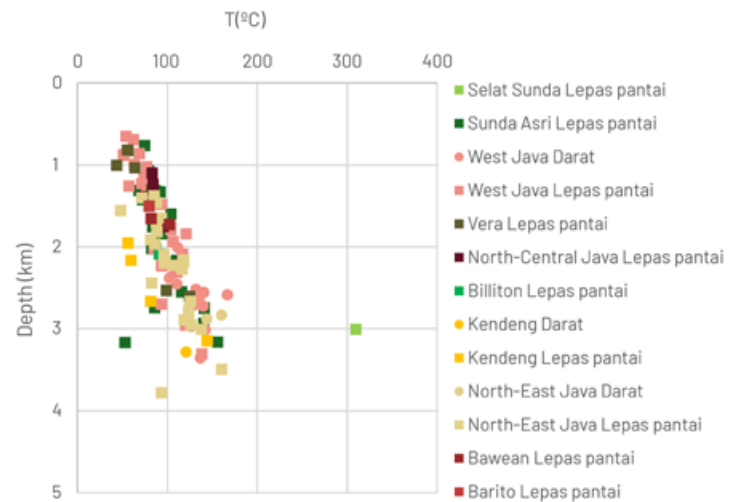
GRADIEN GEOTERMAL PADA SUMUR MINYAK



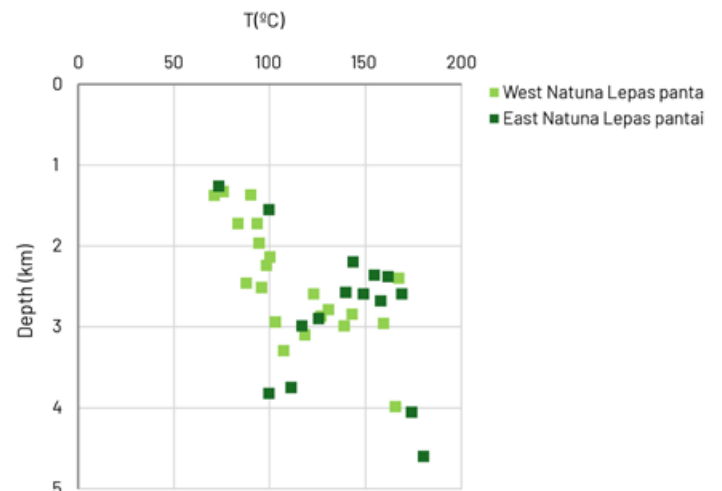
Sumatra Region



Java Region

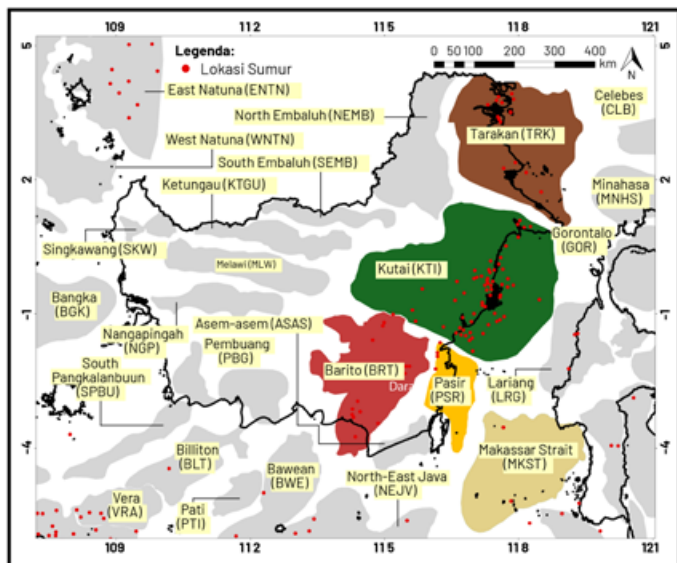


Natuna

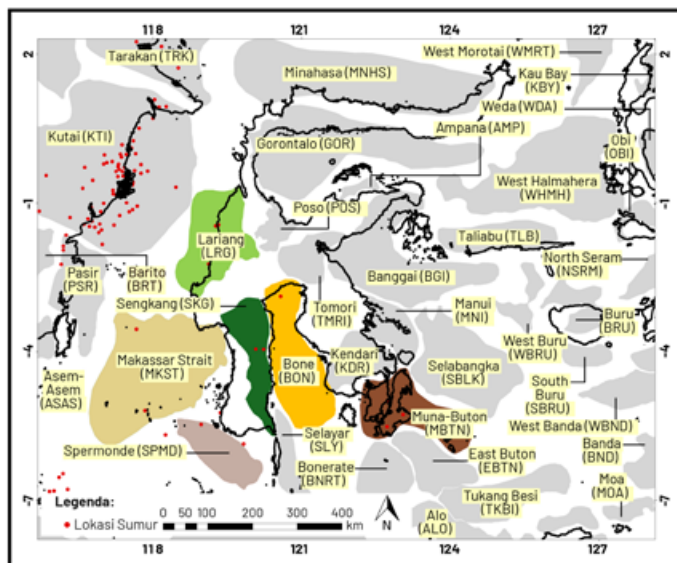
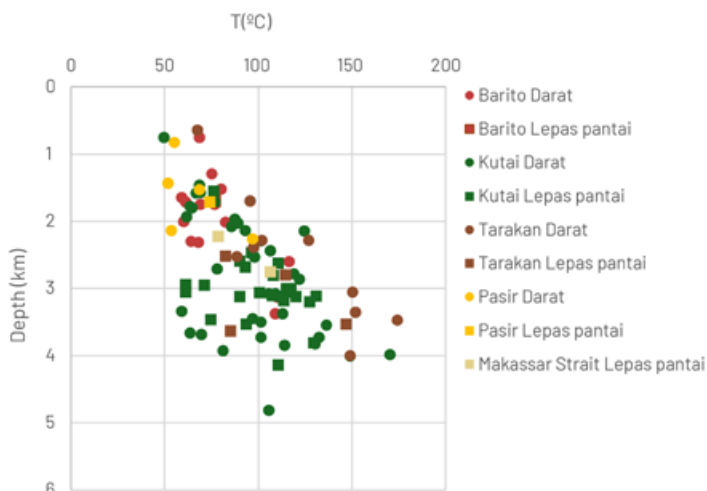


Gambar 3.11: Gradien geotermal pada beberapa sumur minyak darat dan lepas pantai terpilih. Sumber: dikompilasi dari berbagai referensi, termasuk Indonesian Petroleum Association. (1981). Geothermal gradient map of Indonesia (2nd ed.). AAPG Archives Datapages.

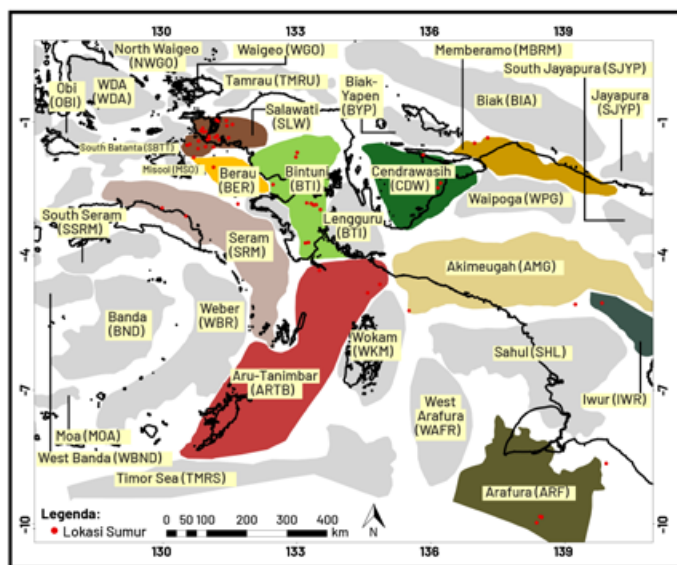
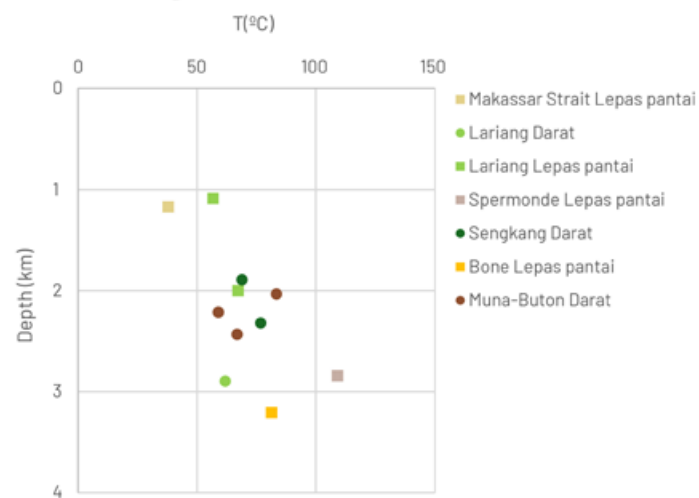




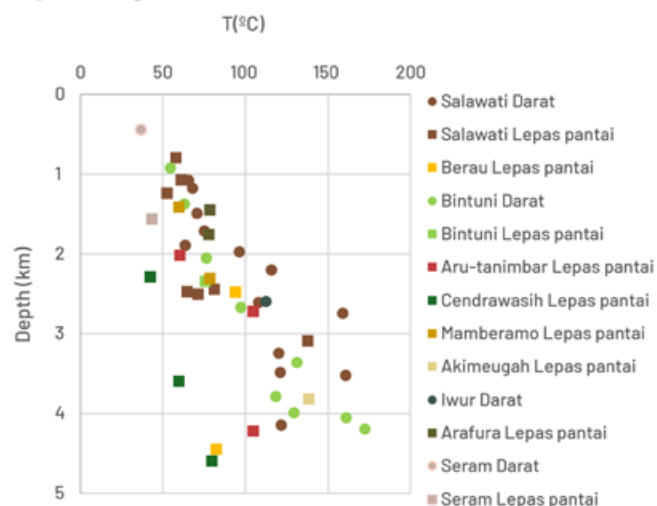
Kalimantan Region



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 naik⁵⁸. 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**).

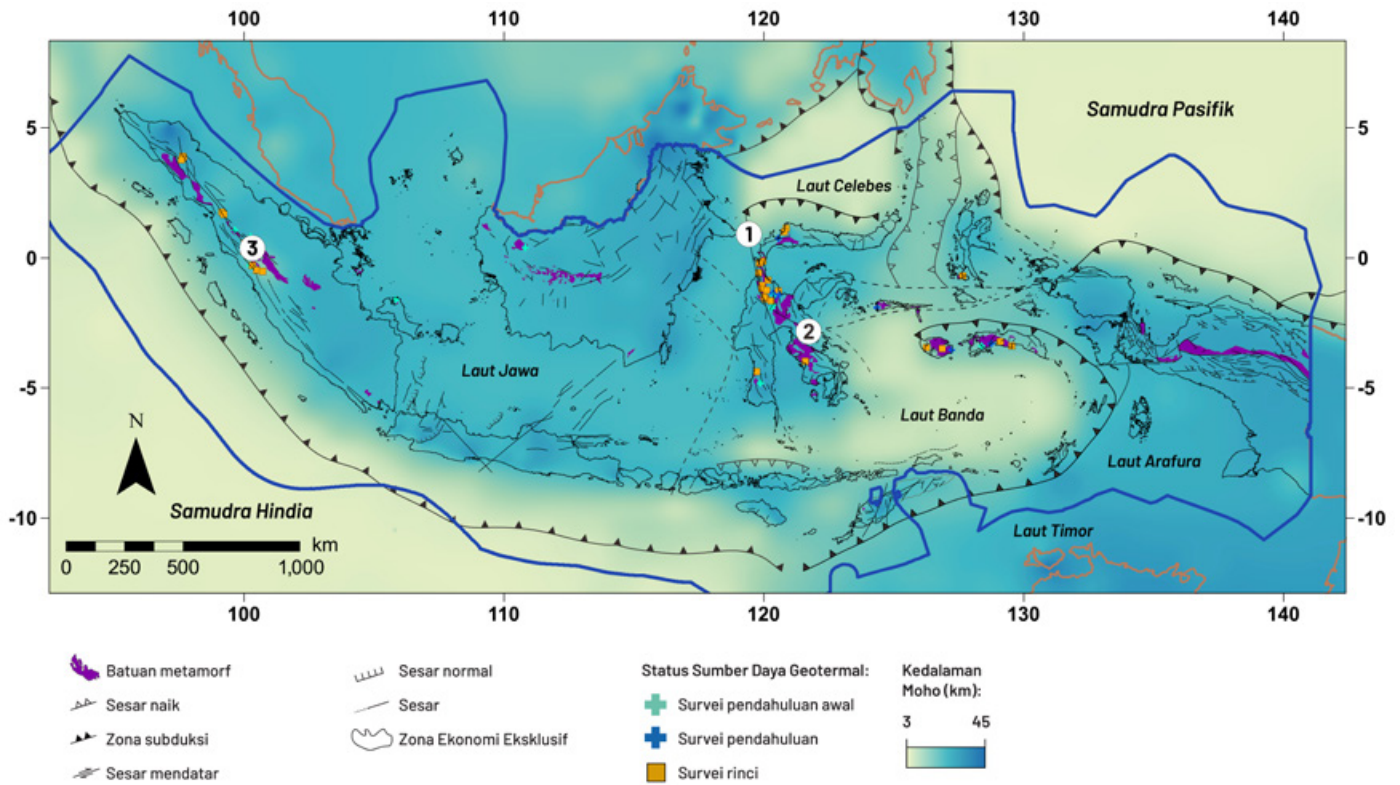
Di Sulawesi, berbagai manifestasi geotermal telah diidentifikasi, khususnya di bagian selatan dan tenggara. Namun, data temperatur reservoir yang tersedia menunjukkan bahwa gradien geotermal berada pada kisaran normal (**Gambar 3.11**). Dengan mempertimbangkan keberadaan manifestasi, ketebalan cekungan, 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 bertemperaturtinggi 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 Wapsalit⁶⁷ 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 berurusan 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



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



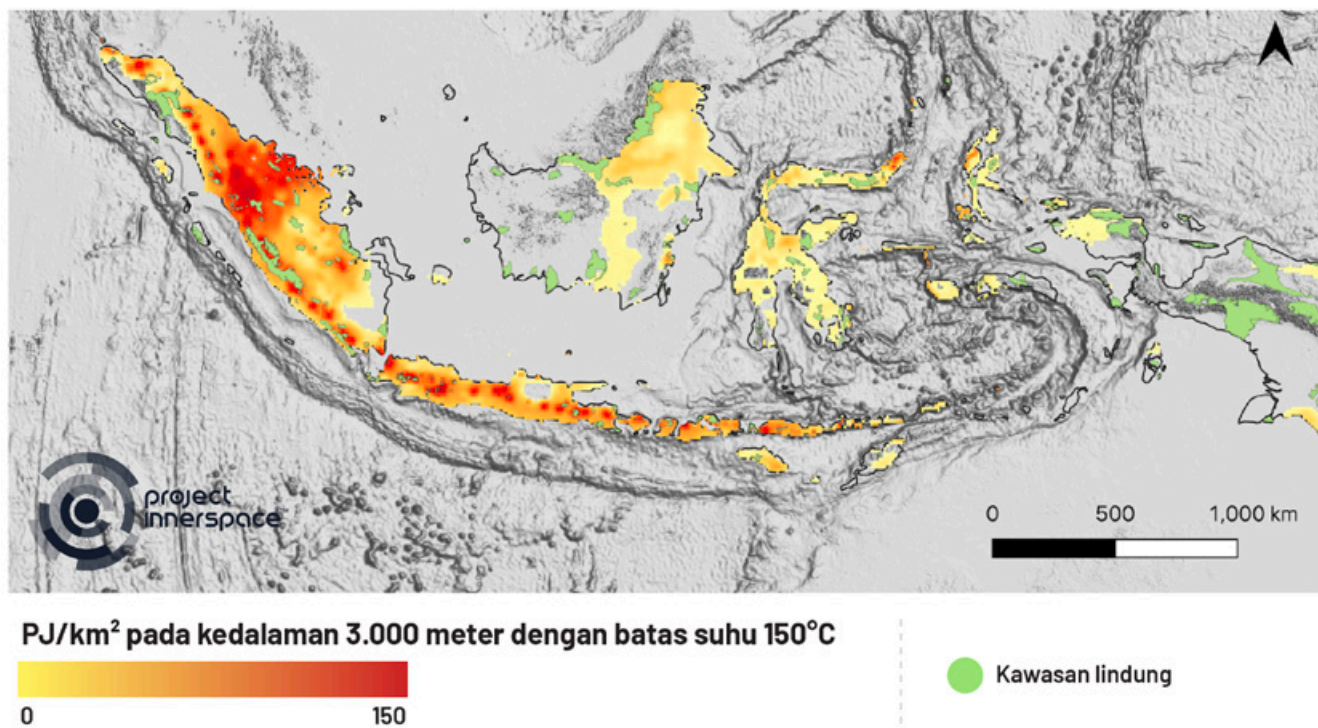
ada sirkulasi fluida alami (berbeda dengan sistem hidrotermal konvensional).

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 InnerSpace¹, 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 2050². 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.

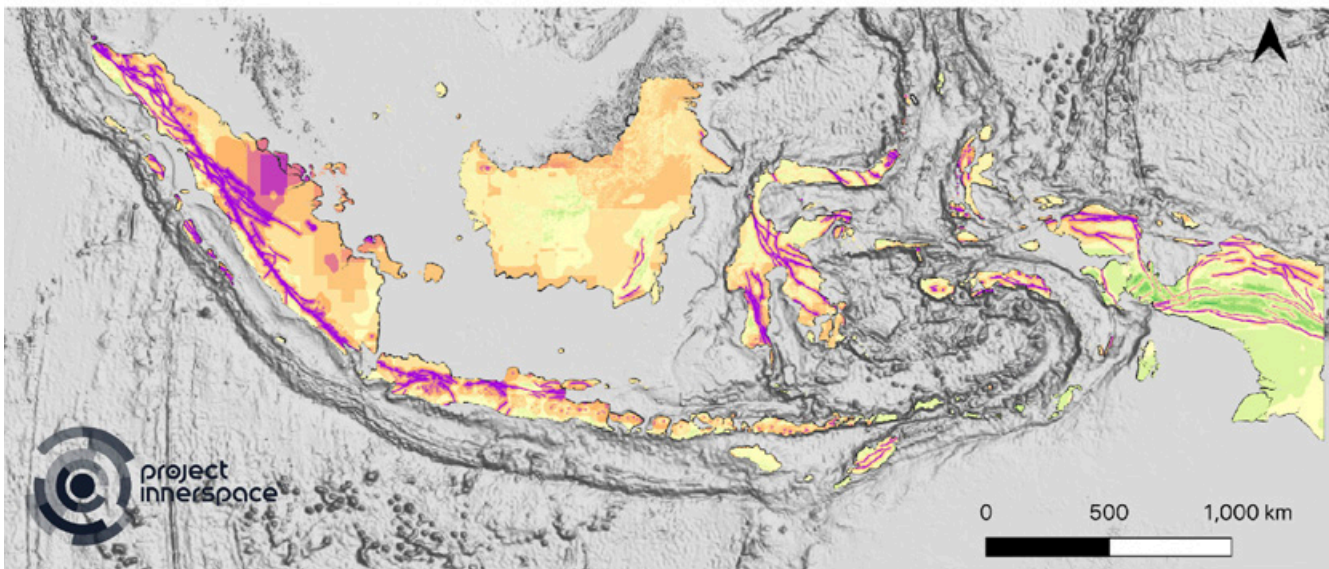
Selain untuk pendinginan, panas bumi juga dapat memainkan peran transformatif di sektor industri Indonesia. Sumber daya bertemperatur sedang menawarkan pasokan panas yang stabil dan rendah karbon bagi industri manufaktur, pengolahan pangan, serta sektor energi intensif lainnya. Pada temperatur yang lebih 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



Potensi sumber daya panas bumi berdasarkan Analisis Overlay Tertimbang (WOA):

- 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

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/km²) 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 Augustine⁵, 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 berpermeabilitas 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 pemanasan 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 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 keragamannya 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>
- Sukanto, 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). Geochemical 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/10.1113/aej.v3.15399>

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

Sukanto, 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-ruknpdf
- 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](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., & Espindola, 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 volcanoclastic 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., Sugimoto, 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., Nielsson, 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., Edelman, T., Bertani, R., Sæther, S., & Pálsson, 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., Martínez, 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., & Muhandjo. (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_1.pdf
- 6 Project InnerSpace. (n.d.). *Subsurface WOA*. https://storage.googleapis.com/project-innerspace-tile-output-prod/Subsurface_WOA_1.pdf
- 7 Project InnerSpace. (2025). GeoMap. <https://geomap.projectinnerspace.org/map-selection/>

