



# Bagian I

---

## **Pengetahuan Dasar Panas Bumi**



## Bab 1

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

*Project InnerSpace*

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

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

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

Namun, sepanjang sejarah, sistem panas bumi konvensional (*hydrothermal*) ini memiliki keterbatasan secara geografis.

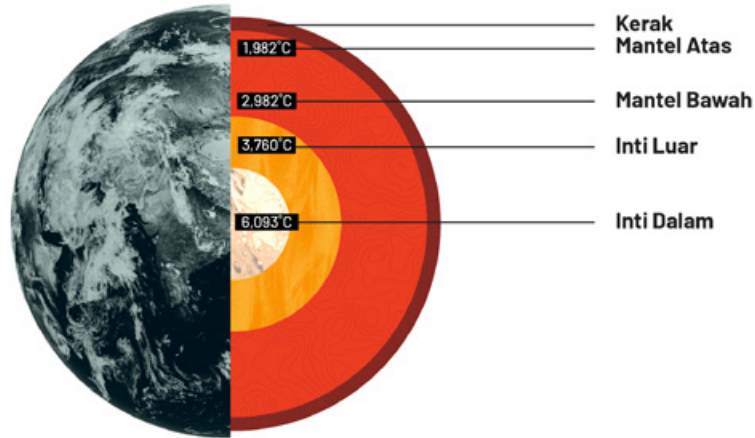
Sistem tersebut hanya bisa berfungsi jika kondisi bawah tanahnya mendukung, yaitu terdapat suhu panas yang cukup, keberadaan air, dan celah atau pori batuan yang memungkinkan aliran fluida (permeabilitas), yang umumnya hanya ditemukan di wilayah dengan aktivitas tektonik tinggi seperti Indonesia, Islandia,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

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



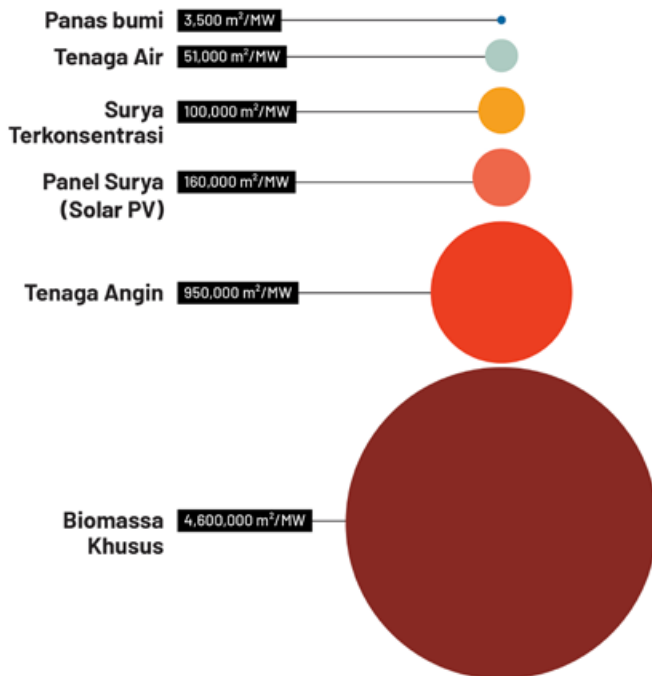
## SUHU BAGIAN DALAM BUMI

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



## MEMBANDINGKAN JEJAK PERMUKAAN

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



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

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

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

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

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



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

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

## PEMBANGKIT LISTRIK PANAS BUMI

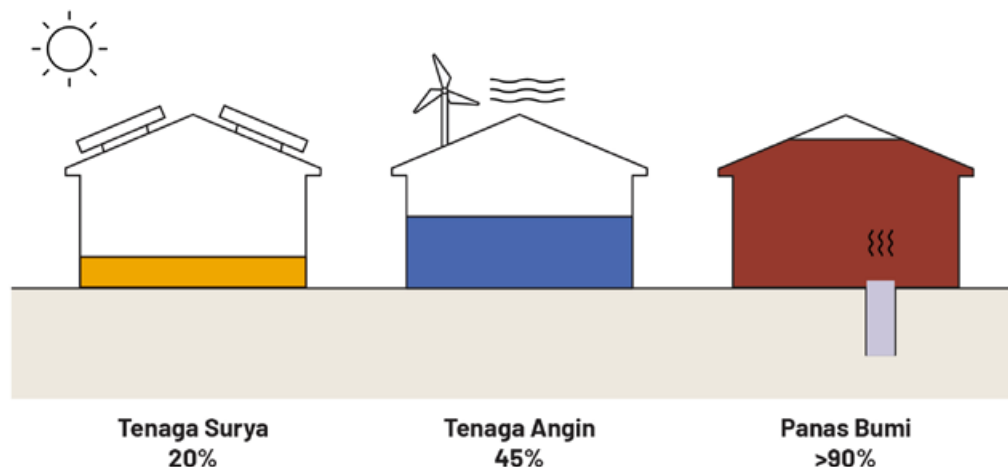
Dengan teknologi baru, secara umum, semakin panas sumber daya geotermal, semakin efisien pembangkit listrik dalam menghasilkan energi. Semakin tinggi efisiensinya, semakin rendah biaya produksinya. Seperti terlihat pada **Gambar 1.4**, pembangkitan listrik tenaga panas bumi dapat dilakukan pada suhu fluida serendah

90°C menggunakan pembangkit siklus ganda (*binary cycle power plant*) – artinya terdapat dua siklus fluida.<sup>8,9</sup> Pada pembangkit jenis binary, air panas yang diambil dari reservoir mengalir melalui penukar panas (*heat exchanger*) untuk mendidihkan cairan lain dengan titik didih rendah. Uap dari cairan kedua inilah yang memutar turbin untuk menghasilkan listrik, sementara air panas geotermal tidak pernah langsung masuk ke turbin.<sup>10</sup> Kedua fluida berputar dalam sistem tertutup – cairan kerja didinginkan dan digunakan kembali, sementara air panas geotermal disuntikkan kembali ke bawah tanah, sehingga emisi sangat minimal sambil tetap memungkinkan pembangkitan listrik dari sumber bersuhu rendah hingga sedang. Turbin uap kilat (*flash steam*) dan uap kering (*dry steam*) (lihat **Gambar 1.5**) digunakan bila suhu fluida melebihi 180°C.<sup>11</sup> Beberapa instalasi dengan suhu lebih tinggi kini juga mulai menggunakan konfigurasi inovatif berbasis siklus ganda (*binary-type*).

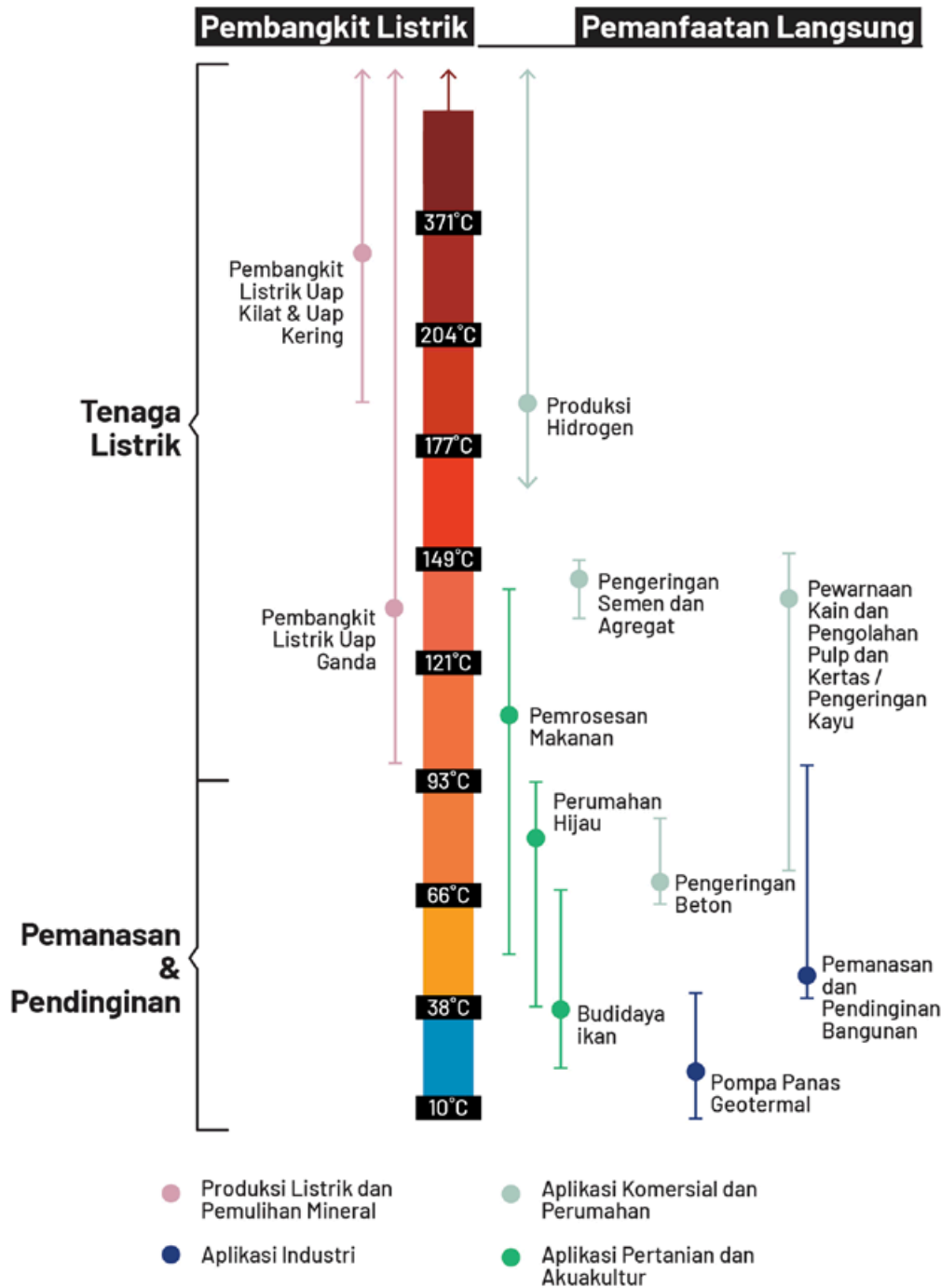
Sebuah laporan yang diterbitkan pada tahun 2024 oleh International Energy Agency (IEA) menyatakan bahwa “potensi panas bumi kini benar-benar bersifat global” dan sistem panas bumi generasi baru memiliki potensi teknis “untuk memenuhi kebutuhan listrik dunia hingga 140 kali lipat.<sup>12</sup> Analisis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

## PERBANDINGAN FAKTOR KAPASITAS

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



# APLIKASI PANAS BUMI DAN KEBUTUHAN TEMPERATUR



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

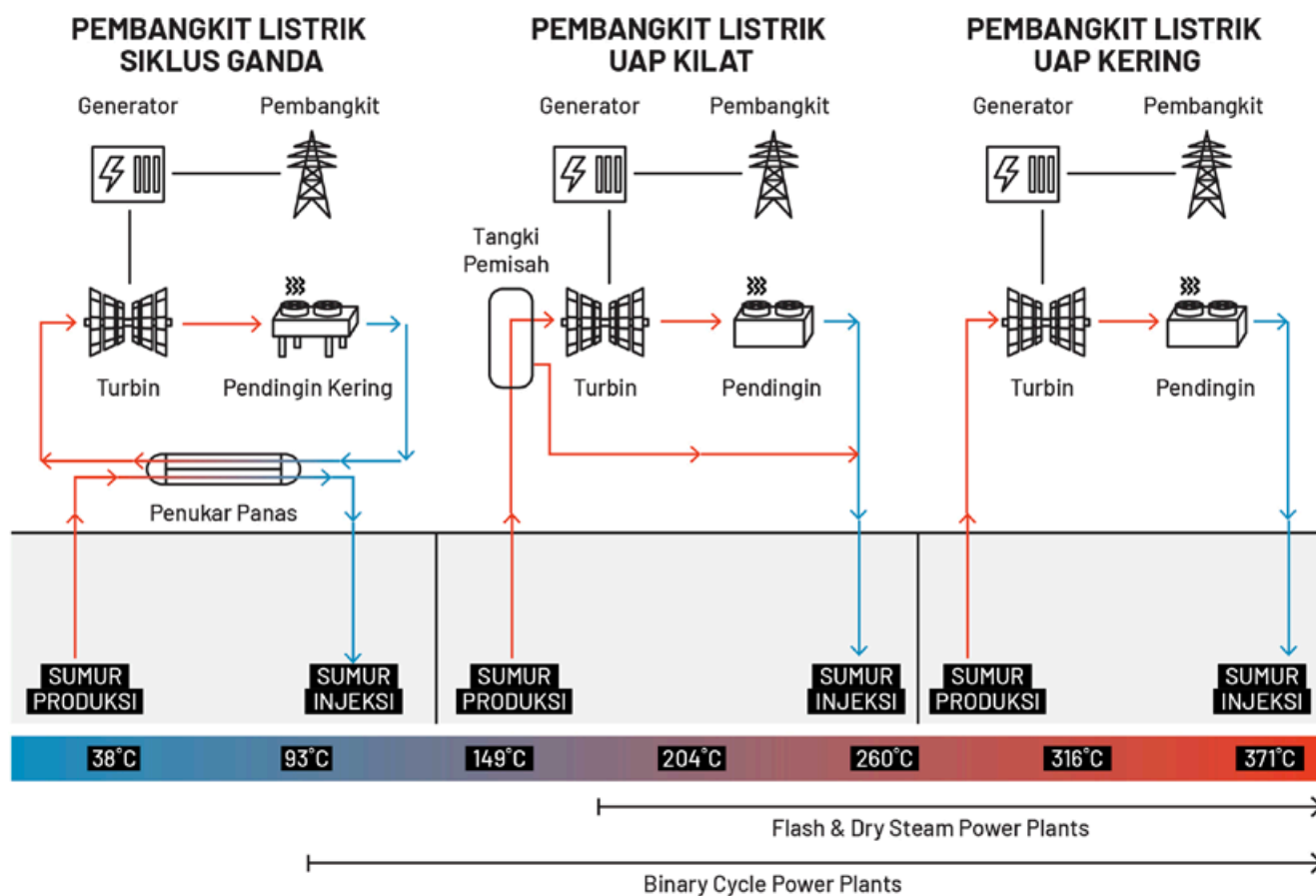
## PEMANFAATAN LANGSUNG: PEMANASAN, PENDINGINAN, DAN PROSES INDUSTRI DENGAN ENERGI PANAS BUMI

Sekitar tiga perempat dari seluruh energi panas yang digunakan manusia—mulai dari pemanasan dan

pendinginan bangunan hingga proses industri—dihasilkan dengan membakar minyak, gas, dan batubara secara langsung.<sup>14</sup> Sisanya berasal dari sumber lain, seperti pembakaran biomassa, atau melalui elektrifikasi panas, yaitu listrik yang dihasilkan dari tenaga surya, angin, atau bahan bakar lain, kemudian diubah kembali menjadi panas (misalnya dengan pemanas listrik).



## JENIS-JENIS PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI



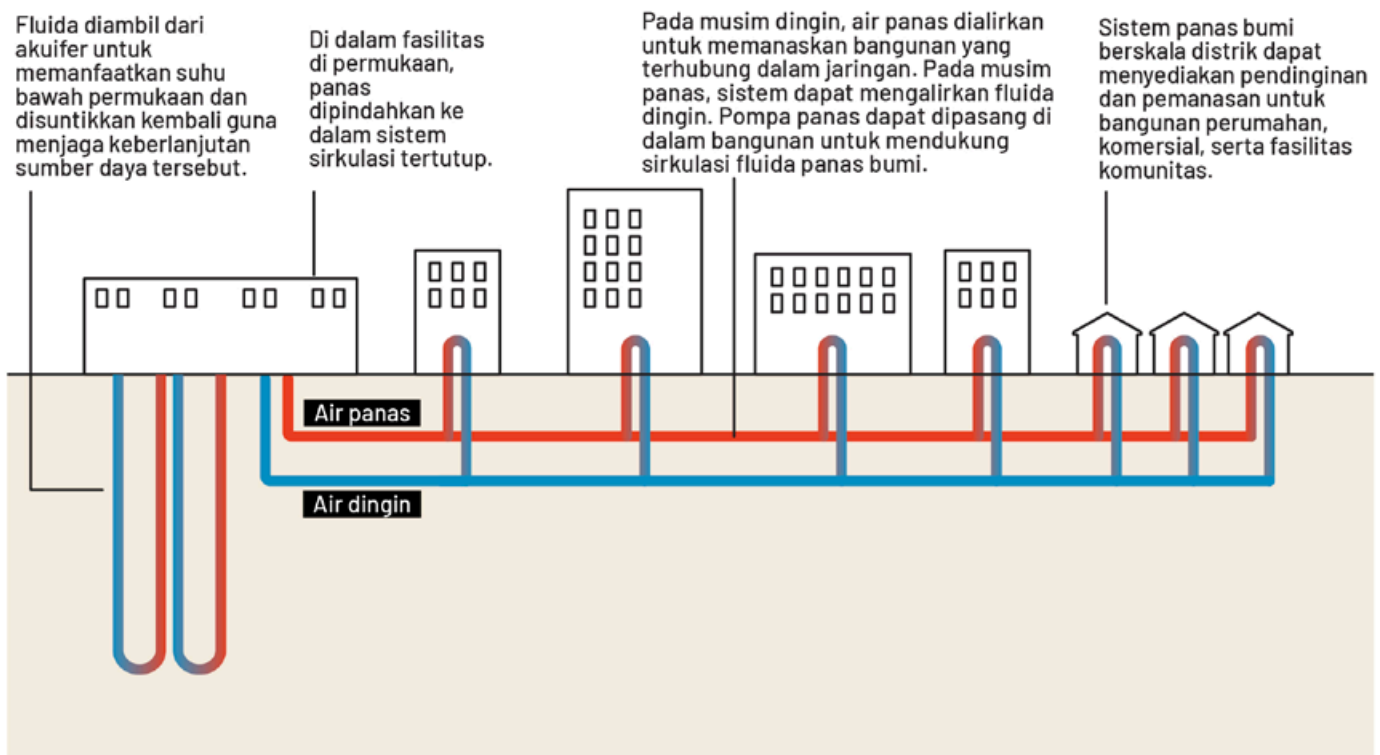
**Gambar 1.5:** Ada tiga konfigurasi utama untuk menghasilkan listrik menggunakan energi panas bumi: siklus ganda (*binary*), uap kilat (*flash*), dan uap kering (*dry steam*). Secara umum, dengan teknologi baru saat ini, semakin panas sumber daya panas bumi di bawah tanah—baik dari sistem hidrotermal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

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

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



## JARINGAN PENDINGINAN DAN PEMANASAN PANAS BUMI



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

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

Semua sistem pendinginan dan pemanasan bangunan (HVAC) serta 30% panas yang digunakan dalam proses manufaktur di seluruh dunia beroperasi pada suhu di bawah 150°C.<sup>17</sup> Di banyak wilayah dunia, panas bumi pada kisaran suhu ini memiliki biaya yang sebanding dengan sumber energi lain seperti batubara, biomassa, tenaga surya, dan angin. Laporan IEA memperkirakan bahwa panas bumi generasi baru secara ekonomis dapat

memenuhi hingga 35% dari seluruh permintaan panas industri global untuk proses yang memerlukan suhu di bawah 200°C.

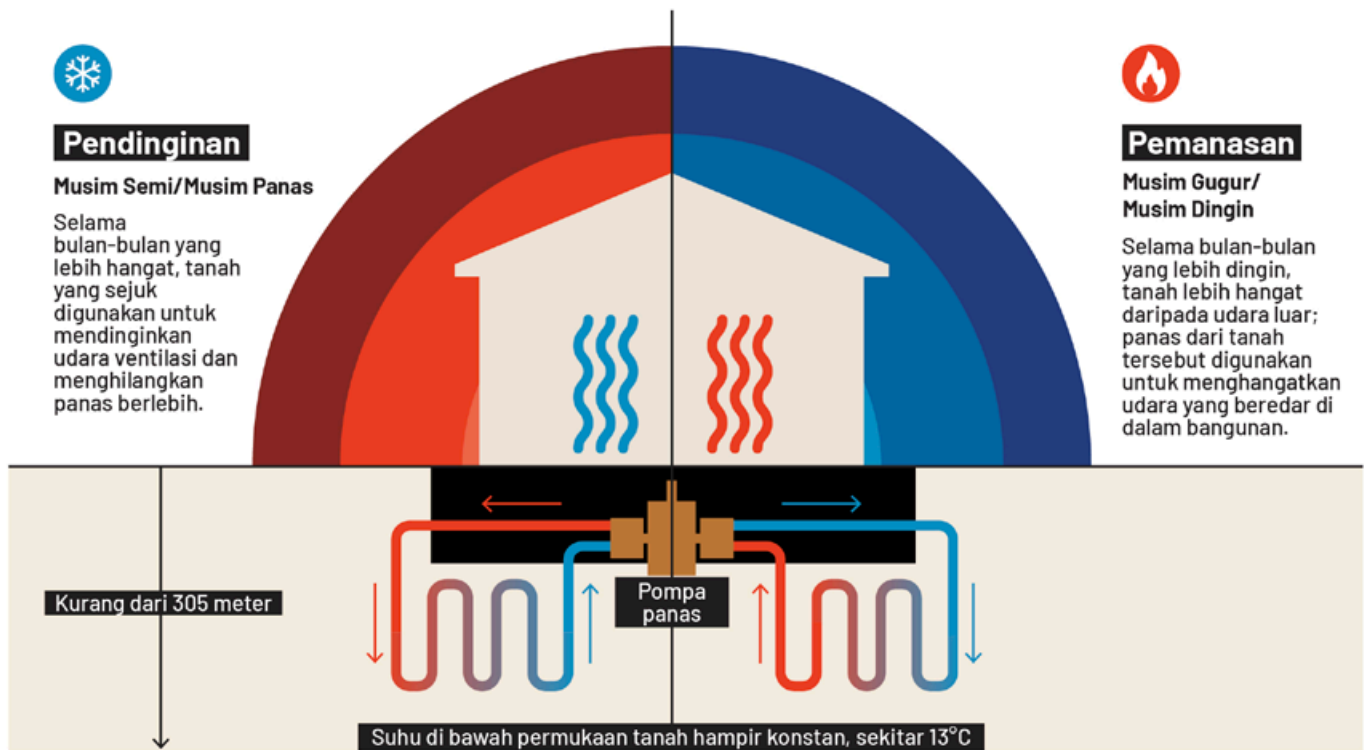
Pemanfaatan panas bumi generasi baru ini berpotensi menghemat sekitar 750 juta ton emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)— setara dengan total emisi tahunan Kanada, negara penghasil emisi terbesar ke-12 di dunia.<sup>18</sup> **Gambar 1.7** memperlihatkan berbagai sektor dan proses industri yang dapat memanfaatkan panas bumi, baik dengan maupun tanpa pompa panas, tergantung pada kemampuan lokasi fasilitas untuk mencapai suhu panas yang diperlukan pada kedalaman bawah tanah yang wajar.

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





# PENDINGINAN DAN PEMANASAN DENGAN POMPA PANAS SUMBER TANAH



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

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

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

Dengan memanfaatkan panas bumi seperti ini, pendingin absorpsi dapat memberikan pendinginan tanpa memerlukan kompresor listrik konvensional atau pembakaran bahan bakar fosil. Bagi Indonesia, di mana

sistem pendinginan menyumbang sekitar 40–60% dari konsumsi listrik di kota-kota besar,<sup>19</sup> teknologi pendingin absorpsi panas bumi menawarkan solusi berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan refrigerasi dan pendingin udara, sekaligus mengurangi beban jaringan listrik dan menekan emisi gas rumah kaca.

## PENYIMPANAN ENERGI PANAS BUMI (GEOTHERMAL ENERGY STORAGE / GES)

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



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

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

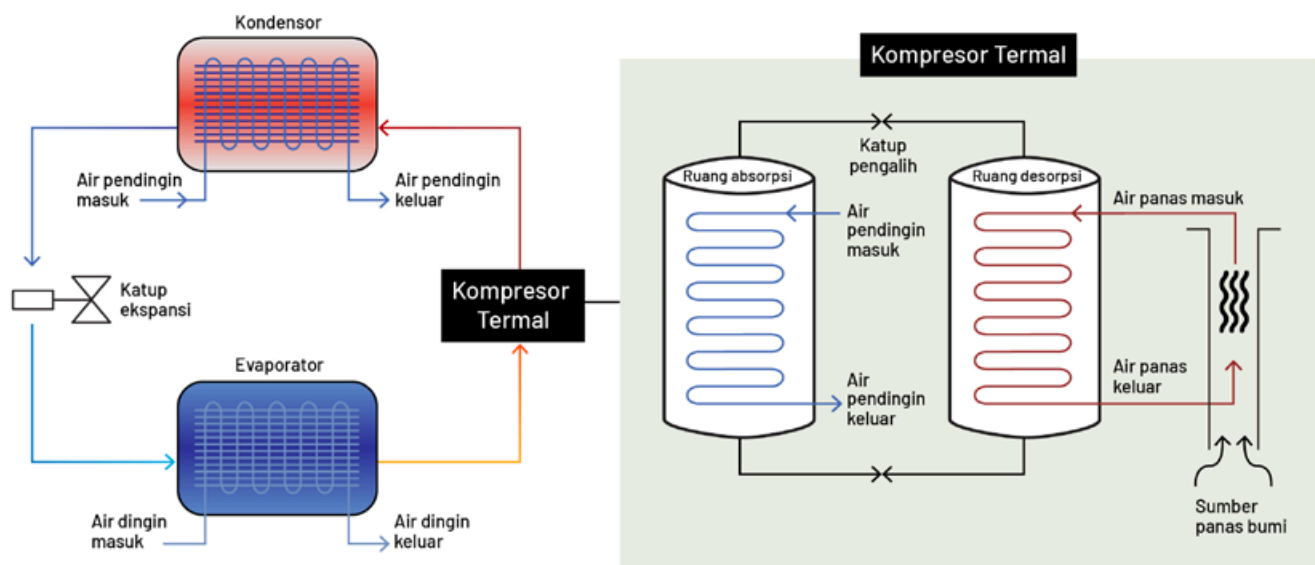
## EKSTRAKSI MINERAL KRITIS

Dalam sistem panas bumi, fluida atau air garam (*brine*) sering kali dihasilkan sebagai bagian dari proses

produksi energi. Air garam ini kaya akan mineral terlarut, termasuk litium, yang dapat diekstraksi untuk memenuhi permintaan global yang meningkat terhadap baterai litium-ion, terutama untuk kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi jaringan listrik. Pendekatan ganda ini – menghasilkan energi bersih sekaligus menyediakan sumber litium domestik – berpotensi mengurangi dampak lingkungan dari penambangan litium tradisional serta meningkatkan nilai ekonomi proyek panas bumi.

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

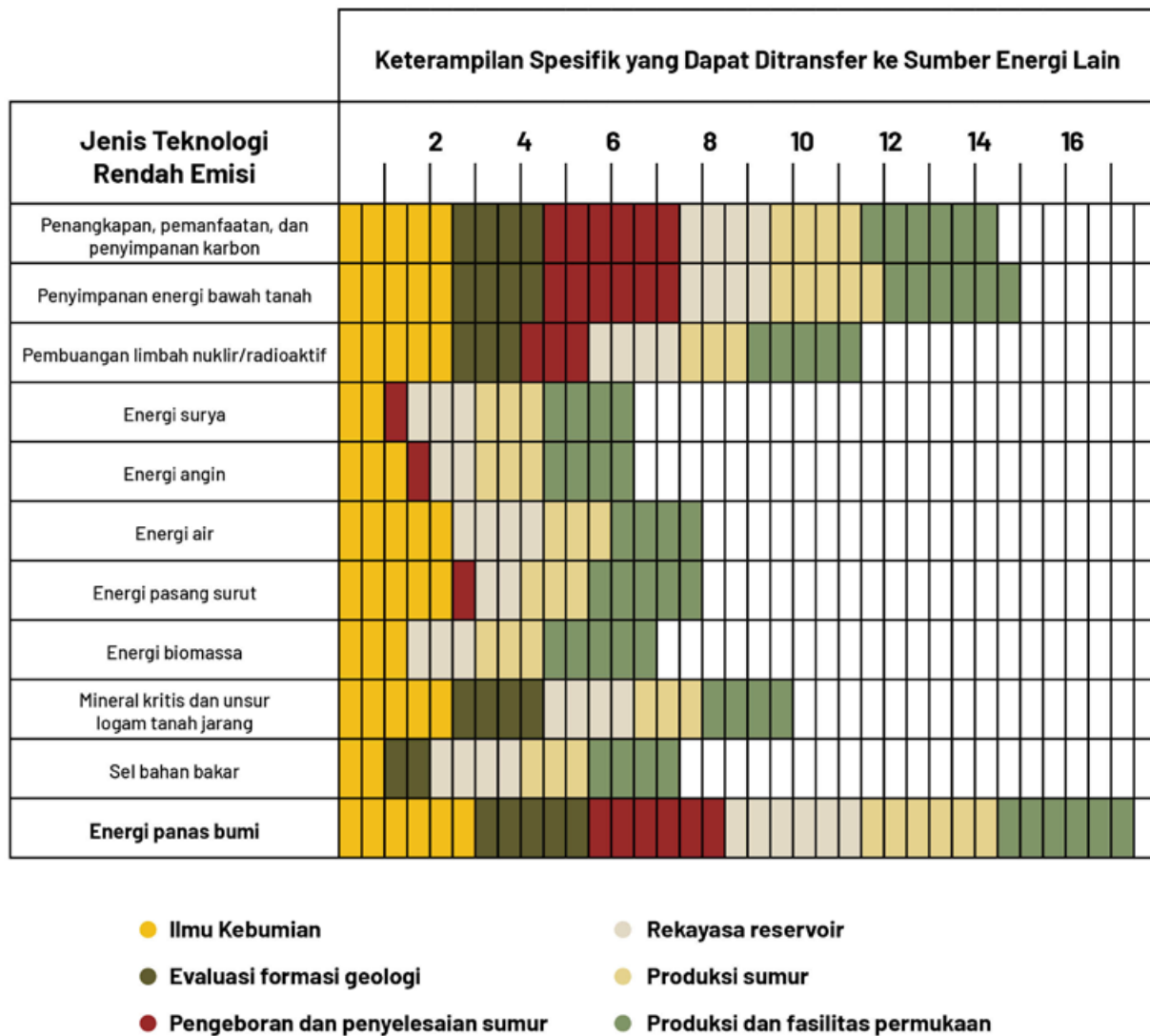
## PENDINGIN ABSORPSI



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



# KETERAMPILAN YANG DAPAT DIALIHKAN DARI INDUSTRI MINYAK DAN GAS



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

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

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

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



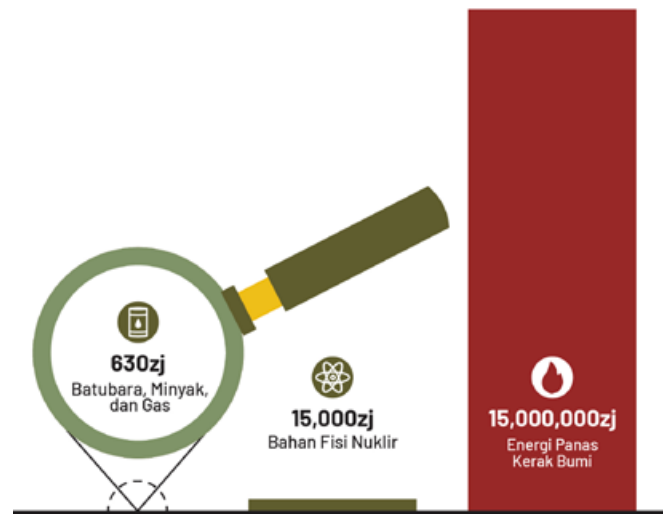
Saat ini, banyak desain sumur panas bumi berbasis AGS sedang dikembangkan, termasuk sumur tunggal, sumur berbentuk U (“doublet”) dengan sumur injeksi dan produksi, serta desain radiator bawah tanah. Semua desain ini hanya menggunakan jalur pengeborannya sendiri, tanpa membutuhkan sumber daya hidrotermal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

Seluruh ekstraksi energi panas bumi bergantung pada konduksi, yaitu perpindahan panas dari batuan panas ke fluida (lihat bagian “Geothermal Geology and Heat Flow” untuk penjelasan lebih lanjut). Berbeda dengan EGS, yang diuntungkan oleh luas permukaan besar hasil rekahan hidrolik, AGS hanya memiliki dinding sumur bor sebagai area konduksi panas. Oleh karena itu, sistem AGS perlu mengebor lebih dalam, lebih panas, atau lebih panjang dibandingkan EGS untuk dapat menghantarkan jumlah panas yang setara. Karena AGS tidak bertukar fluida dengan bawah permukaan, sistem ini dapat lebih mudah menggunakan fluida kerja hasil rekayasa non-air, seperti CO<sub>2</sub> superkritik. Seiring dengan kemajuan teknologi, AGS kini juga mulai dikembangkan untuk proyek berskala industri. Sebagai contoh, XGS Energy dan Meta (Facebook) baru-baru ini bekerja sama membangun pembangkit listrik AGS berkapasitas 150 megawatt pertama di dunia di Amerika Serikat, yang akan memanfaatkan batuan panas sekitar 250°C untuk memasok energi bagi pusat data di New Mexico.<sup>23</sup>

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

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

## KELIMPAHAN ENERGI PANAS BUMI



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

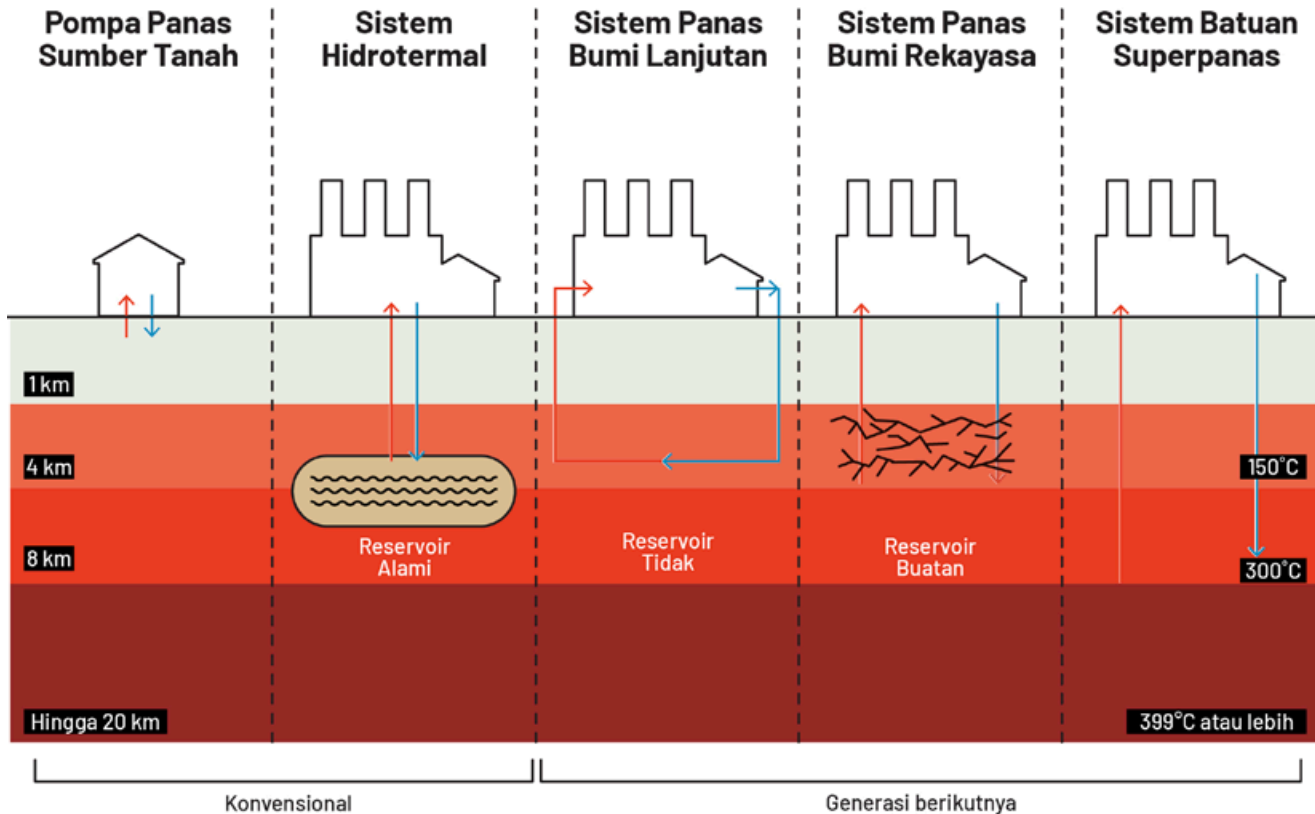
rekahan yang terbentuk, semakin luas permukaan batuan yang bersentuhan dengan fluida, sehingga transfer panas menjadi lebih efisien.

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

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



## JENIS-JENIS SISTEM ENERGI PANAS BUMI



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

pada lokasi di mana suhu yang cukup tinggi dan kondisi tekanan yang sesuai ditemukan.<sup>25</sup>

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

### **Sistem Batuan Superpanas (Superhot Rock / SHR):**

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



# GEOLOGI PANAS BUMI DAN ALIRAN PANAS

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

## Konduksi, Adveksi, Konveksi, dan Radiasi

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

- **Konduksi:** Pemindahan energi antara benda yang bersentuhan secara fisik melalui getaran molekul, tanpa perpindahan massa. Konduksi efisien pada beberapa bahan (seperti logam) dan kurang efisien pada bahan lain. Batu adalah konduktor panas yang relatif buruk, tetapi proses konduksi tetap signifikan di bagian dalam bumi.
- **Adveksi:** Pemindahan panas yang disebabkan oleh pergerakan cairan dari satu lokasi ke lokasi lain. Dalam konteks geologi, adveksi terjadi melalui pergerakan magma dan air tanah, di mana fluida membawa panas saat bergerak melalui retakan, celah, dan formasi batuan berpori. Adveksi berbeda dari konduksi karena tidak mengandalkan kontak langsung antarpartikel, melainkan perpindahan massa fluida.
- **Konveksi:** Siklus perpindahan panas yang melibatkan konduksi dan adveksi, terjadi ketika materi dipanaskan, menjadi kurang padat dan naik, kemudian mendingin, menjadi lebih padat, dan tenggelam kembali. Proses ini menciptakan sirkulasi naik-turun yang berulang. Mantel bumi sebagian besar bersifat padat, tetapi berperilaku seperti fluida

sangat kental, sehingga memungkinkan terjadinya perpindahan panas secara konvektif. Pergerakan mantel ini sangat lambat dalam skala waktu manusia, tetapi signifikan dalam skala geologis.

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

## Geologi dan Ekstraksi Energi

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

### Didominasi Konveksi

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

### Didominasi Konduksi

2. Sistem Tertutup dengan Porositas/Permeabilitas Terbatas: Dalam sistem ini, air tidak mengalir secara alami. Untuk mengekstraksi energi panas bumi, diperlukan rekayasa tambahan seperti rekahan hidrolik (*hydraulic fracturing*).
3. Sistem Tertutup dengan Porositas/Permeabilitas Alami: Sistem ini memiliki ruang pori alami hingga kedalaman tertentu yang memungkinkan sebagian aliran fluida. Kondisi ini bermanfaat terutama untuk penyimpanan energi panas yang digunakan dalam sistem pemanasan dan pendinginan.



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

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



## Geografi, Aplikasi, dan Teknologi Baru

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



## Geografi, Aplikasi, dan Teknologi Baru

|                             | Batuan Superpanas  | Sistem Panas Bumi Sedimenter   | Sistem Panas Bumi Rekayasa  |
|-----------------------------|--|--|---|
| <b>Konsep Dasar</b>         | Sistem tertutup tanpa pertukaran fluida dengan lapisan bawah tanah   | Menggunakan suhu tanah atau bawah permukaan untuk memberikan pendinginan di bangunan atau proses industri  | Menyimpan energi panas di reservoir bawah tanah untuk digunakan kembali dalam pemanasan, pendinginan, atau pembangkitan listrik |
| <b>Fluida Kerja</b>         | Mengalirkan fluida (air, CO <sub>2</sub> superkritik, atau lainnya) sepenuhnya dalam sistem tertutup dan terencana   | Air atau refrigeran bersirkulasi untuk mentransfer suhu dingin ke bangunan   | Air atau fluida penghantar panas lainnya untuk penyimpanan panas; pemulihan optimal pada reservoir bertekanan                   |
| <b>Jenis Reservoir</b>      | Tertutup terhadap reservoir; menggunakan pipa tertutup dan jalur rekayasa  | Tertutup atau terbuka dengan pipa di tanah dangkal yang memanfaatkan pendinginan tanah   | Reservoir bawah tanah tertutup atau akuifer untuk penyimpanan energi, menggunakan jalur alami atau rekayasa                     |
| <b>Persyaratan Geologis</b> | Tidak memerlukan permeabilitas; berfungsi di mana pun ada ketersediaan panas   | Umumnya tidak memerlukan persyaratan khusus; cocok untuk sebagian besar tanah dangkal dengan suhu stabil   | Memerlukan ruang bawah tanah dengan retensi tekanan yang memadai untuk penyimpanan panas dan energi                             |
| <b>Rentang Suhu</b>         | Bervariasi; biasanya membutuhkan batuan panas >100°C untuk penyerapan panas yang kompetitif  | Memanfaatkan suhu alami tanah (~13°C) untuk pendinginan, serta suhu dalam tanah yang lebih dalam dengan teknologi pendinginan absorpsi                       | Fleksibel; dapat disesuaikan untuk penyimpanan panas musiman atau pengiriman energi bersuhu tinggi                              |
| <b>Kedalaman Pengeboran</b> | Berpotensi lebih dalam untuk mengakses panas tinggi, tetapi terbatas oleh area permukaan yang tersedia untuk transfer panas konduktif                                      | Umumnya dangkal, antara 3-152 meter, karena pendinginan memerlukan suhu lebih rendah; lebih dalam >100°C dengan teknologi pendinginan absorpsi               | Bervariasi; dapat dangkal untuk penyimpanan musiman atau dalam untuk penyimpanan suhu tinggi                                    |
| <b>Skalabilitas</b>         | Dapat ditingkatkan; sistem tidak tergantung pada permeabilitas bawah permukaan   | Dapat ditingkatkan untuk aplikasi residensial, komersial, dan industri   | Dapat ditingkatkan; cocok untuk integrasi dengan sumber energi terbarukan untuk penyimpanan energi                              |
| <b>Dampak Lingkungan</b>    | Dampak rendah; sistem tertutup tanpa interaksi dengan batuan sekitar   | Dampak minimal; sistem tertutup mencegah kontaminasi tanah   | Dampak rendah; bergantung pada manajemen tekanan untuk penyimpanan panas yang aman  |
| <b>Contoh Penggunaan</b>    | Berbagai desain sistem tertutup dalam pengembangan, seperti Eavor-Loop dan GreenFire Energy's GreenLoop  | ADNOC bekerja sama dengan National Central Cooling Company PJSC (Tabreed) menginisiasi operasi di G2COOL, Masdar City, Abu Dhabi                             | Penyimpanan energi panas bawah tanah, penyimpanan energi panas lubang bor, dan penyimpanan energi panas akuifer                 |
| <b>Keunggulan Utama</b>     | Tidak ada pertukaran fluida dengan bawah permukaan; cocok untuk area tanpa akuifer alami   | Pendinginan hemat biaya di wilayah dengan permintaan pendinginan tinggi; menurunkan biaya HVAC; dapat digunakan untuk mengoptimalkan pendinginan data center | Menyediakan penyimpanan energi untuk menyeimbangkan energi terbarukan dan mendukung stabilitas jaringan listrik                 |
| <b>Challenges</b>           | Biaya pengeboran tinggi; area transfer panas terbatas dibandingkan dengan sistem panas bumi yang ditingkatkan (EGS); membutuhkan lebih banyak sumur untuk penyerapan panas | Biaya instalasi dan awal; memerlukan area tanah yang sesuai untuk pemasangan   | Memerlukan kondisi geologis tertentu untuk pengendalian tekanan; biaya pengeboran bisa tinggi                                   |



## REFERENSI

- 1 Unwin, J. (2019, 8 Oktober). Pembangkit listrik tenaga panas bumi tertua di dunia. *Teknologi Daya*. <https://www.power-technology.com/features/oldest-geothermal-plant-larderello/>. Listrik panas bumi digunakan pada awal tahun 1960 di Amerika Serikat. Lihat Rafferty, K. (2000, Januari). *Pembangkit listrik panas bumi: Primer untuk aplikasi skala kecil suhu rendah*. Pusat Geo-Panas. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/894040#>
- 2 Laboratorium Energi Terbarukan Nasional. (2017). *Dasar teknologi tahunan: Panas bumi*. <https://atb-archive.nrel.gov/electricity/2017/index.html?t=gt&s=ov>
- 3 Datta, A. (2023). *Batuan panas: Mengkomersialkan energi panas bumi generasi berikutnya*. Institut untuk Kemajuan. <https://ifp.org/hot-rocks-commercializing-next-generation-geothermal-energy/>
- 4 Badan Energi Terbarukan Internasional (IRENA) & Asosiasi Panas Bumi Internasional (IGA). (2023). *Panas bumi global: Penilaian pasar dan teknologi*. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA\\_Global\\_geothermal\\_market\\_technology\\_assessment\\_2023.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Global_geothermal_market_technology_assessment_2023.pdf)
- 5 Cariaga, C. (2025, 20 Januari). *100 negara panas bumi teratas ThinkGeoEnergy 2024–power*. PikirkanGeoEnergi. <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2024-power/>
- 6 Suryadarma, Dwikorianto, T., Zuhro, A. A., & Yani, A. (2010). Pengembangan berkelanjutan lapangan panas bumi Kamojang. *Panas bumi*, 39(4), 391–399. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.09.006>
- 7 Data Global. (2024). *Kapasitas tenaga panas bumi di Indonesia dan proyek-proyek besar*. *Teknologi Daya*. <https://www.power-technology.com/data-insights/geothermal-power-in-indonesia/>
- 8 Insinyur Konsultan Verkis. (2014). *Pembangkit listrik biner panas bumi: Studi pendahuluan pemanfaatan suhu rendah, perkiraan biaya, dan biaya energi*. [https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/lceida-geothermal-binary-overview\\_small.pdf](https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/lceida-geothermal-binary-overview_small.pdf)



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

