

PERBANDINGAN METODE VOLUMETRIK DAN MONTE CARLO UNTUK ESTIMASI POTENSI PANAS BUMI DI LAPANGAN X

Dimas Anabil Pasha¹, Akhmad Sofyan^{1,2*}, Diyah Rosiani¹

¹Teknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, 58315

²Program Studi Geologi, Fakultas Ilmu Kebumian, Universitas Szeged, 13 Dugonics Square, Szeged, 6720

*E-mail: akhmads@esdm.go.id

ABSTRAK

Indonesia memiliki potensi energi panas bumi yang sangat besar, mencapai 40% dari cadangan global. Estimasi potensi yang akurat sangat penting untuk perencanaan pengembangan lapangan geotermal. Penelitian ini membandingkan metode volumetrik deterministik dengan metode Monte Carlo probabilistik dalam mengestimasi potensi pembangkitan listrik Panas Bumi di lapangan X, Jawa Barat. Metode volumetrik menghitung energi tersimpan menggunakan parameter tunggal dari data geosains (luas area, ketebalan reservoir, temperatur, porositas, dan densitas), sedangkan metode Monte Carlo memodelkan ketidakpastian melalui 20.000 simulasi dengan variabel input mengikuti distribusi probabilitas (*uniform*, *triangular*, dan *normal*). Hasil perhitungan menunjukkan metode volumetrik menghasilkan estimasi 55,55 MWe (selisih 14,54% dari data resmi KESDM 65 MWe), sementara metode Monte Carlo menghasilkan nilai median (P50) 65,19 MWe memberikan selisih hanya 0,03% dari data KESDM dengan rentang ketidakpastian 37,61–79,86 MWe (P90–P10). Metode Monte Carlo terbukti lebih representatif karena mampu mengkuantifikasi ketidakpastian dan memberikan rentang kepercayaan estimasi, sehingga lebih andal untuk evaluasi risiko dan pengambilan keputusan investasi pengembangan lapangan geotermal.

Kata kunci: *Geothermal*, Metode Volumetrik, Metode Monte Carlo

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi panas bumi yang sangat besar, diperkirakan mencapai sekitar 40% dari total potensi global, yang berkaitan erat dengan posisi negara ini di zona pertemuan lempeng tektonik dan aktivitas vulkanik sepanjang busur vulkanik Indonesia [1]. Pemanfaatan panas bumi menjadi salah satu opsi strategis dalam upaya transisi menuju pasokan energi yang lebih bersih dan berkelanjutan [2]. Oleh karena itu, estimasi yang tepat mengenai sumber daya dan cadangan sangat penting sebelum tahap pengembangan lapangan geotermal [3]. Estimasi potensi panas bumi memerlukan rangkaian survei geosains—geologi, geokimia, dan geofisika—yang menghasilkan parameter dasar seperti area prospek, ketebalan reservoir, temperatur, serta sifat batuan dan fluida [4].

Dari parameter-parameter ini dihitung besaran energi yang tersimpan dalam sistem panas bumi menggunakan berbagai pendekatan. Salah satu pendekatan yang banyak dipakai adalah metode volumetrik, yang secara sederhana memandang reservoir sebagai sebuah volume dan menghitung energi tersimpan berdasarkan luas, ketebalan, porositas, densitas, dan kapasitas panas material penyusunnya [5]. Studi kasus Lapangan X oleh Sofyan dan rekan (2020) memperlihatkan penerapan metode volumetrik menghasilkan estimasi sekitar 55,55 MWe—nilai yang relatif dekat dengan angka potensi yang dilaporkan oleh KESDM sebesar 65 MWe [6]. Meskipun demikian, perhitungan volumetrik umumnya bersifat deterministik dan bergantung pada asumsi titik (*single-value*) untuk tiap parameter, sehingga tidak secara ekspli-

sit menangani ketidakpastian yang inheren pada data eksplorasi [7]. Metode Monte Carlo menawarkan pendekatan alternatif berbasis probabilistik untuk mengatasi keterbatasan tersebut [8].

Dengan memodelkan variabel-variabel kunci (misalnya porositas, temperatur reservoir, recovery factor) sebagai distribusi probabilitas dan menjalankan ribuan simulasi acak, metode ini menghasilkan distribusi hasil (P10, P50, P90) yang mencerminkan rentang kemungkinan dan tingkat kepercayaan estimasi [9]. Pendekatan ini memberikan gambaran risiko dan ketidakpastian yang lebih lengkap dibandingkan angka tunggal dari pendekatan deterministik [10]. Penelitian ini mengkaji perbandingan antara metode volumetrik dan metode Monte Carlo dalam konteks estimasi potensi panas bumi dengan menggunakan parameter yang serupa dengan studi Lapangan X. Tujuan utamanya adalah menilai sejauh mana pendekatan probabilistik mampu memperkaya informasi estimasi potensi—baik dari sisi nilai pusat maupun rentang ketidakpastian—sehingga dapat memberikan rekomendasi metodologis bagi evaluasi sumber daya panas bumi di Indonesia.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan di lapangan X yang berlokasi di Jawa Barat. Evaluasi dan perkiraan potensi geotermal merupakan komponen penting dalam kegiatan survei di kawasan geotermal [11]. Proses ini melibatkan analisis hasil survei geologi, geokimia, dan geofisika (3G) untuk menentukan parameter kunci seperti luas area yang diteliti, ketebalannya, dan suhu reservoir [12]. Tujuan utama dari evaluasi dan perkiraan potensi energi geotermal adalah menghitung jumlah energi panas yang tersimpan dalam sistem reservoir menggunakan data geosains yang tersedia. Akurasi hasil perkiraan sangat bergantung pada kelengkapan dan kualitas data geosains yang diperoleh. Aktivitas ini mencakup penilaian potensi suatu prospek dan perkiraan cadangan energi geotermal yang dapat diekstraksi [13]. Beberapa pendekatan dapat digunakan untuk menghitung potensi energi geotermal, termasuk metode volumetrik dan metode Monte Carlo [14].

A. Metode Volumetrik

Metode volumetrik adalah pendekatan yang umum digunakan untuk menghitung potensi sumber daya geotermal dan menilai ukuran sumber daya geotermal. Metode ini memperkirakan jumlah energi geotermal yang dapat dimanfaatkan sebagai cadangan, serta potensi pembangkitan energi listrik dari sumber daya tersebut [15]. Metode volumetrik didasarkan pada prinsip bahwa reservoir geotermal merupakan kotak yang volumenya dihitung dengan mengalikan luas distribusi dengan ketebalan lapisan reservoir.

Dengan pendekatan ini, sumber daya atau cadangan geotermal diperkirakan dengan menghitung total energi panas yang tersimpan dalam reservoir, termasuk baik batuan maupun fluida di dalamnya [16]. Berbagai referensi menjelaskan cara menghitung potensi energi geotermal yang tersimpan menggunakan persamaan turunan. Rumus yang dipilih umumnya disesuaikan dengan ketersediaan data yang ada. Untuk keperluan pembahasan ini, persamaan berikut digunakan [17]:

$$Q_T = Q_r + Q_w \quad (1)$$

dimana jumlah energi panas yang tersimpan dalam batuan.

$$Q_r = A \cdot h \cdot [\rho_r \cdot C_r \cdot (1 - \phi) \cdot (T_i - T_f)] \quad (2)$$

dan ini juga berlaku untuk jumlah energi panas yang terkandung dalam fluida.

$$Q_w = A \cdot h \cdot [\rho_w \cdot C_w \cdot \phi \cdot (T_i - T_f)] \quad (3)$$

B. Metode Monte Carlo

Studi ini menerapkan metode Monte Carlo untuk menganalisis dan mengukur tingkat ketidakpastian dalam perkiraan potensi energi geothermal di Lapangan X [18]. Setiap parameter yang digunakan dalam perhitungan diberi distribusi probabilitas sesuai dengan karakteristiknya dan ketersediaan data. Misalnya, parameter dengan rentang nilai minimum dan maksimum diasumsikan mengikuti distribusi uniform; parameter dengan nilai minimum, paling mungkin, dan maksimum diasumsikan mengikuti distribusi segitiga; dan parameter yang memiliki data pengukuran yang cukup banyak diasumsikan mengikuti distribusi normal [19]. Proses simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti Python dengan mengambil sampel secara acak dari setiap distribusi untuk menghasilkan ribuan kombinasi nilai parameter—umumnya antara 10.000 dan 50.000 iterasi [20]. Kombinasi nilai ini kemudian digunakan untuk menghitung total energi panas yang tersimpan dalam batuan dan fluida menggunakan persamaan volumetrik. Persamaan ini kemudian dikonversi menjadi perkiraan potensi daya listrik dalam megawatt listrik (MWe) [21].

Pada penelitian kali ini, dilakukan asumsi perbedaan nilai beberapa parameter sebanyak 20% dikarenakan keterbatasan data yang diperoleh. Semua iterasi menghasilkan hasil dalam bentuk distribusi data potensi energi geothermal, yang diwakili oleh histogram dan kurva distribusi kumulatif (CDF), serta nilai kuantil P10, P50, dan P90. P10 menunjukkan perkiraan optimis, P50 menggambarkan nilai median yang paling mungkin, dan P90 mewakili perkiraan pesimis [22].

3. PEMBAHASAN

A. Geologi Lapangan X

Busur vulkanik yang terbentuk ketika Lempeng Indo-Australia menunjam di bawah Lempeng Eurasia di zona Palung Jawa memiliki hubungan dengan sumber daya *geothermal* di Lapangan X (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Lokasi dan Letak Tektonik Regional Area Panas Bumi Lapangan X

Endapan piroklastik dan lava andesit dari era Pliosen hingga Kuarterner membentuk dataran vulkanik ini. Berdasarkan penanggalan radiometrik, batuan di kawasan ini berusia antara 0,12 hingga 1,25 juta tahun, menurut laporan Fauzi dkk. Tidak ada catatan letusan di

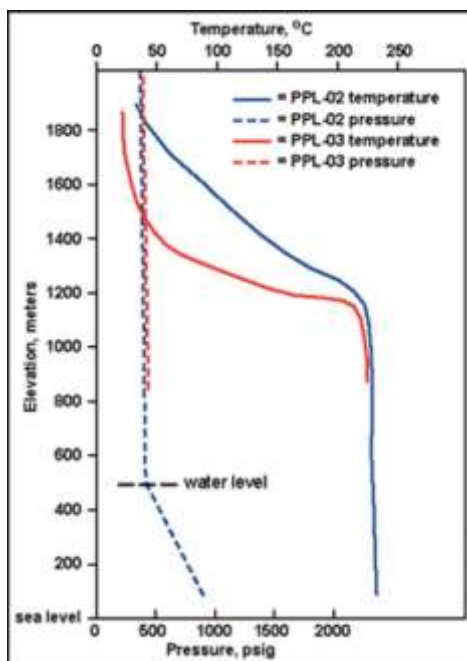
wilayah ini. Namun, pemeriksaan foto udara menunjukkan bahwa lapangan geotermal X mengandung sejumlah lubang vulkanik atau pusat vulkanik [23].

Penataan pusat-pusat vulkanik tahap akhir di Lapangan X menunjukkan adanya sumbu vulkanik di sana. Pusat-pusat ini sebagian besar ditemukan di sepanjang zona yang membentang ke barat-barat laut seluas sekitar 5×10 kilometer. Ventilasi vulkanik dari tahap akhir ini berada di ketinggian lebih dari 1.800 meter di atas permukaan laut dan mencakup kubah lava, kerucut vulkanik, kawah, serta area aliran lava baru. Kubah Gunung A dan bagian selatan X keduanya berada di zona ini, begitu pula kawah-kawah di zona kerucut X Utara. Sumbu vulkanik ini menunjukkan bahwa ia terhubung langsung dengan sistem geothermal lapangan X[6].

Sebagian besar formasi batuan yang dilalui oleh sumur geotermal di lapangan X terbuat dari lava, tufa, dan breksi. Intrusi diorite atau mikrodiorite memotong lapisan batuan vulkanik ini di beberapa tempat. Di beberapa sumur juga terdapat lapisan berwarna merah muda yang kaya akan lempung, yang diyakini sebagai paleosol. Lapisan-lapisan semacam ini dapat membuat dinding sumur menjadi tidak stabil, yang dapat menyebabkan masalah dalam proses pengeboran[23].

B. Geokimia Lapangan X

Ada tiga zona fumarol utama di permukaan Lapangan Geotermal X: Kawah A, Kawah B, dan Kawah C. Ketinggiannya berkisar antara 1.800 hingga 2.250 meter di atas permukaan laut. Terdapat juga sumber air panas di ketinggian yang lebih rendah (sekitar 1.600 hingga 1.850 meter di atas permukaan laut) di bagian selatan, barat, dan barat laut dataran vulkanik. Terdapat juga area pelepasan gas dingin antara Kawah B dan Kawah C, pada ketinggian sekitar 1.950 meter di atas permukaan laut, serta di bagian selatan dataran vulkanik, pada ketinggian sekitar 1.800 meter di atas permukaan laut.



Gambar 2. Profil Tekanan dan Temperatur Sumur Lapangan X

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis fluida termal oleh Fauzi et al. (1994), diketahui bahwa fluida pada area fumarol Kawah A dan Kawah B tergolong air asam sulfat dengan pH

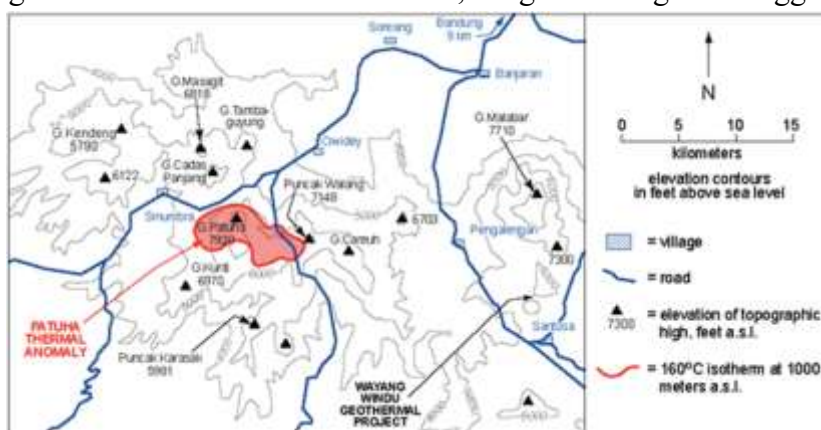
berkisar antara 2 hingga 3. Salah satu mata air panas di sekitar Kawah A termasuk dalam jenis air campuran asam sulfat–klorida, dengan kandungan klorida kurang dari 400 ppm. Sebaliknya, air danau di Kawah D memiliki karakteristik air sangat asam dengan kadar garam tinggi (hyper-acid chloride–sulfate fluids), ditandai dengan pH sekitar 0,5 dan kandungan klorida mencapai 13.000 ppm [24].

Pengujian dan analisis terhadap cairan termal dan menemukan bahwa cairan di area fumarol kawah A dan B merupakan air asam sulfat dengan pH antara 2 dan 3. Dengan kandungan klorida kurang dari 400 bagian per juta, salah satu sumber air panas di dekat Kawah C dikategorikan sebagai air asam sulfat-klorida campuran. Air danau di Kawah D, di sisi lain, memiliki pH sekitar 0,5 dan kandungan klorida hingga 13.000 bagian per juta. Air ini juga sangat asam dan mengandung banyak garam (cairan klorida-sulfat hiperasam).

Berdasarkan data profil suhu, puncak zona konvektif reservoir uap terletak antara 700 dan 1.000 meter di bawah permukaan laut, atau antara 900 dan 1.200 meter di atas permukaan laut untuk sebagian besar sumur. Dengan ketebalan lapisan uap sekitar ± 700 meter, zona terendah dengan permeabilitas tertinggi terletak pada kedalaman sekitar 1.000 meter di atas permukaan laut. Pada ketinggian sekitar 1.000 meter, tekanan di dekat puncak zona uap berkisar antara 250 hingga 700 psia, dan suhu tertinggi yang tercatat berada antara 209 hingga 242 °C. Dari pusat anomali termal, tekanan di zona uap ini secara bertahap menurun ke arah timur, terutama menuju wilayah Kawah C [6].

C. Geofisika Lapangan X

Peta anomali termal dalam Lapangan Geotermal X ditampilkan pada Gambar 3. Data suhu bawah permukaan dari 14 sumur uji produksi dan 17 lubang inti digunakan untuk menentukan distribusi anomali ini terkait dengan sumber daya geotermal. Lubang inti ini memiliki kedalaman pengeboran rata-rata sekitar 803 meter, dengan rentang 650 hingga 1.200 meter.



Gambar 3. Peta Lokasi Anomali Termal di Dataran Tinggi Vulkanik Lapangan X

Anomali termal ini memiliki panjang sekitar 10 kilometer dan lebar yang bervariasi antara 1 hingga 3 kilometer, membentang ke arah barat dan barat laut. Pada ketinggian 1.000 meter di atas permukaan laut, luas total anomali termal ini sekitar 20 kilometer persegi. Kontur suhu 200°C pada ketinggian tersebut berada dekat dengan batas luar area yang memiliki potensi produksi uap komersial yang layak, berdasarkan hasil pengeboran sumur produksi uji di bagian timur zona anomali[25].

Daerah dengan nilai log antara 2,0 dan 2,8 dan konduktivitas magnetotellurik (MT) antara 100 dan 630 mhos pada kedalaman hingga 2 km dianggap memiliki nilai resistivitas rendah. Di sisi lain, bagian selatan dan timur anomali termal memiliki zona resistivitas tinggi, dengan konduktivitas total sekitar 10 mhos pada kedalaman 2 km. Terdapat anomali gravitasi Bouguer yang mencolok di wilayah ini, yang menunjukkan adanya batuan dasar yang padat dan dangkal atau kemungkinan intrusi di bawah zona vulkanik.

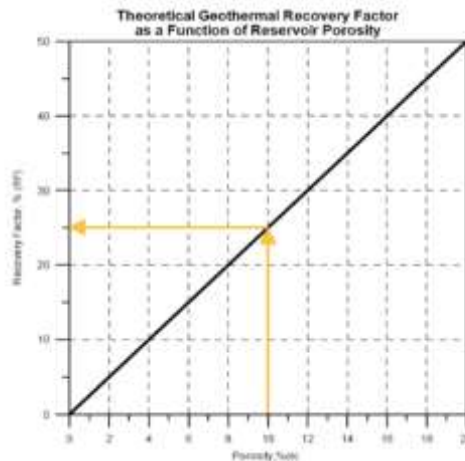
Menurut catatan litologi, lapisan lempung yang kaya dan sangat konduktif yang mengalami alterasi hidrotermal terkait dengan zona resistivitas rendah di dalam anomali termal Lapangan X. Lapisan ini membentuk zona argilik yang tebalnya sekitar 500 meter dan terletak antara 100 dan 300 meter di bawah permukaan. Zona alterasi propilitik yang lebih tahan lama, yang terkait dengan reservoir produktif, tertutupi oleh lapisan ini. Aliran kondensat asam yang mengandung klorida dari Kawah D, yang menurunkan resistivitas batuan dan meningkatkan alterasi argilik, berdampak pada perluasan zona konduktif ke arah barat dan utara. Selain itu, gradien suhu di dua sumur utara menunjukkan adanya akuifer dengan suhu 75–80°C pada ketinggian sekitar 1.750 meter, dan penumpukan material vulkanik di bawah 1.800 meter mendukung pembentukan zona resistivitas rendah ini.

D. Parameter Potensi Panas Bumi Lapangan X

Saat mengevaluasi potensi sumber daya geotermal, faktor-faktor penting berikut ini harus dipertimbangkan:

- Luas Area (A)
Area yang berpotensi adalah luas area yang akan digunakan dalam perhitungan. Lihat Gambar 3., peta lokasi anomali termal. Area yang berpotensi memiliki luas 20 km².
- Ketebalan (h)
Pengukuran profil suhu digunakan untuk memperkirakan ketebalan parameter tersebut. Reservoir tersebut memiliki ketebalan sekitar 700 meter, berdasarkan data profil suhu (Gambar 2), yang didasarkan pada survei geosains sebelumnya.
- Temperatur Reservoir (T_i)
Suhu di dalam reservoir, sebagaimana ditentukan oleh pembacaan suhu, dijelaskan oleh parameter suhu. Suhu reservoir diperkirakan akan naik hingga sekitar $\pm 235^\circ\text{C}$ berdasarkan data ini.
- Temperatur *Cut-off* (T_o)
Suhu terendah di mana energi listrik masih dapat dihasilkan dikenal sebagai suhu batas. Suhu batas yang paling umum digunakan di Indonesia adalah sekitar 180°C .
- Porositas (Φ)
Nilai porositas sebesar 10% telah diasumsikan karena data porositas untuk Lapangan X tidak tersedia.
- Kapasitas Panas Batuan (Cr)
Berdasarkan hasil survei geologi, lava, tufa, dan breksi merupakan batuan yang membentuk sistem geotermal lapangan X. Berdasarkan *specific heat solid table*, Lava memiliki nilai 840 J/kg°C [26].
- Kapasitas Panas Fluida (Cw)
Menginput nilai suhu batas akan menampilkan kapasitas panas fluida. Nilai kapasitas panas fluida ditemukan dengan memasukkan nilai suhu batas ke dalam tabel uap. Nilai kapasitas panas fluida adalah 4.420 kJ/kg.°C karena suhu batas yang diasumsikan adalah 180°C .
- Densitas Batuan (ρ_r)
Berdasarkan *Rock Density Table* berisi nilai densitas batuan, densitas batuan lava adalah 2.680 kg/m³ [27].

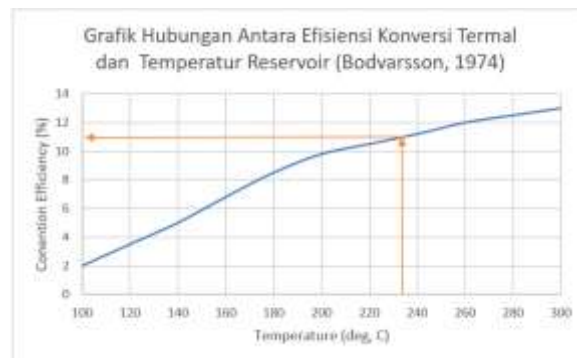
- **Densitas Fluida (ρ_w)**
Nilai suhu batas pada tabel uap dapat digunakan untuk menghitung densitas fluida. Fluida memiliki densitas 886,524 kg/m³ pada suhu batas 180°C.
- **Recovery Factor (RF/ R)**
Recovery Factor adalah rasio antara total energi yang tersimpan dalam batuan reservoir dengan jumlah energi yang dapat diekstraksi darinya. Untuk reservoir geotermal dengan sifat porositas dan permeabilitas yang konsisten, nilai RF sebesar 0,25 biasanya digunakan.



Gambar 4. Grafik Hubungan Antara Porositas dan Recovery Factor

Menampilkan data porositas pada grafik di Gambar 4 akan menghasilkan nilai RF. Nilai RF adalah 25% jika porositasnya 10%.

- **Efisiensi Konversi Pembangkit (η)**
Persentase energi panas dari sumber daya geotermal yang dapat diubah menjadi listrik disebut efisiensi konversi pembangkit listrik. Angka ini biasanya sekitar 10%, tetapi dapat berubah tergantung pada suhu dan jenis siklus yang digunakan. Grafik suhu reservoir versus efisiensi konversi dapat digunakan untuk menghitung hal ini.



Gambar 5. Grafik Hubungan Antara Konversi Termal dan Temperatur Reservoir

Suhu reservoir adalah 235°C. Gambarkan ini pada Gambar 5 untuk mendapatkan estimasi efisiensi konversi generator sebesar $\pm 10,5\%$.

- *Availability Factor*

Dikarenakan keterbatasan data yang diperoleh, maka nilai *availability factor* diasumsikan sebesar 93%[14].

E. Perhitungan Potensi Dengan Metode Volumetrik

Menghitung jumlah energi panas yang tersimpan di reservoir menggunakan data lapangan yang dikumpulkan merupakan langkah pertama dalam menentukan potensi energi.

Tabel 1. Parameter Potensi Sumber Daya Panasbumi Lapangan X

Parameter	Nilai			Satuan	Distribusi
	Min	Most Likely	Max		
Luas Area (A)	12	20	28	Km ²	Triangular
Ketebalan (h)	560	700	840	m	Triangular
Temperatur Reservoir (T_i)	188	235	282	°C	Triangular
Temperatur Cut-off (T_f)	144	180	216	°C	Triangular
Porositas (Φ)		10		%	Fix
Kapasitas Panas Batuan (C_r)		840		J/kg. °C	Fix
Kapasitas Panas Fluida (C_w)		4420		kJ/kg. °C	Fix
Densitas Batuan (ρ_r)		2680		Kg/m ³	Fix
Densitas Fluida (ρ_w)		886,5		Kg/m ³	Fix
Recovery Factor (RF)	20	25	30	%	Triangular
Efisiensi Konversi Pembangkit (η)	8,4	10,5	12,6	%	Triangular
<i>Availability Factor</i> (P_f)	74,4	93	100	%	Triangular

Energi yang terdapat pada reservoir terdiri atas:

- Energi panas yang terdapat di dalam batuan

$$Q_r = A \cdot h \cdot [\rho_r \cdot C_r \cdot (1 - \Phi) \cdot (T_i - T_f)]$$

$$Q_r = 20 \times 700 \times [2,680 \times 840 \times (1 - 0.1) \times (235 - 180)]$$

$$Q_r = 1.56^{12} \text{ kJ/kg}$$

- Energi panas yang terdapat di dalam fluida

$$Q_w = A \cdot h \cdot [\rho_w \cdot C_w \cdot \Phi \cdot (T_i - T_f)]$$

$$Q_w = 20 \times 700 \times [886.524 \times 4,420 \times 0.1 \times (235 - 180)]$$

$$Q_w = 3.017196^{11} \text{ kJ/kg}$$

Dari hasil perhitungan tersebut, maka total energi panas yang terdapat di reservoir:

$$Q_T = Q_r + Q_w$$

$$Q_T = 1.56^{12} \frac{kJ}{kg} + 3.017196^{11} \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_T = 1.862^{12} kJ/kg$$

Sebuah pembangkit listrik dapat menggunakan rumus berikut untuk mengubah energi panas total dari bendungan menjadi energi listrik:

$$P = \frac{(Q_T \cdot R_f \cdot C_e)}{P_f \cdot t} \quad (4)$$

Dengan menggunakan rumus berikut, pembangkit listrik dapat mengubah energi panas total dari bendungan menjadi energi listrik:

$$P = \frac{(Q_T \cdot R_f \cdot C_e)}{P_f \cdot t}$$

$$P = \frac{(1.862^{12} \times 25\% \times 10.5\%)}{93\% \times 30}$$

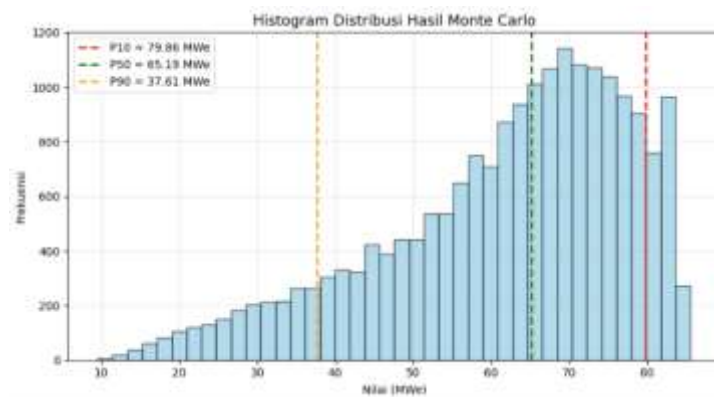
$$P = 55.55 MWe$$

Cadangan geotermal Lapangan X sebesar 65 MWe, menurut data dari publikasi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) tahun 2017 berjudul Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1 (Indonesia's Geothermal Potential, Volume 1). Dengan selisih persentase sekitar 14,54%, hasil perhitungan dalam studi ini cukup dekat dengan angka-angka tersebut [28].

F. Perhitungan Potensi Dengan Metode Monte Carlo

Sebuah kombinasi acak dari parameter masukan dihasilkan untuk setiap dari 20.000 literasi simulasi Monte Carlo. Potensial listrik kemudian ditentukan menggunakan persamaan volumetrik. Hasilnya adalah distribusi keluaran nilai potensial listrik dalam megawatt (MWe). Hasil analisis notebook menunjukkan distribusi log-normal nilai potensial listrik, dengan nilai median (P50) yang hampir identik dengan hasil perhitungan metode volumetrik ± 55 MWe. Namun, nilai P10 dan P90 menunjukkan rentang ketidakpastian yang luas, mencerminkan variasi alami sistem reservoir. Perhitungan monte carlo yang dilakukan pada analisa ini sebagai berikut:

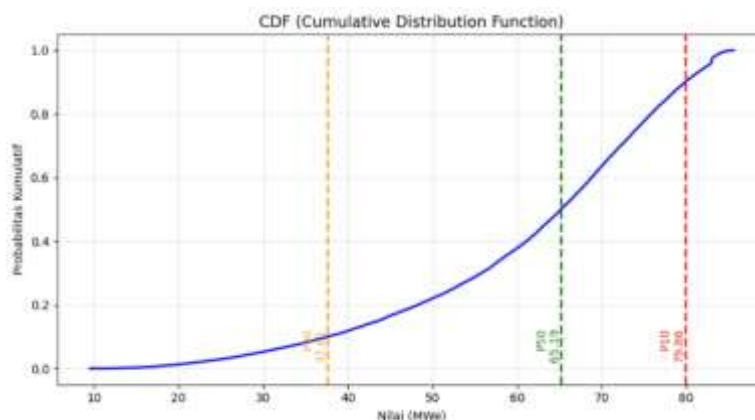
- **Distribusi Potensi Listrik Panas Bumi Lapangan X**



Gambar 6. Plot Distribusi Potensi Listrik Panas Bumi Lapangan X

Distribusi potensi tenaga geothermal sebagai hasil simulasi Monte Carlo Lapangan X ditampilkan pada gambar. Dengan nilai rata-rata (P50) sebesar 65,19 MWe, nilai optimis (P10) sebesar 79,86 MWe, dan nilai pesimis (P90) sebesar 37,61 MWe. Variasinya alami dalam parameter reservoir ditunjukkan oleh pola distribusi, yang sedikit miring ke kanan. Temuan ini, bagaimanapun, secara umum konsisten dengan perkiraan metode volumetrik dan data KESDM yang menunjukkan potensi sekitar 65 MWe [28]. Variabilitas bawaan sistem reservoir tercermin dalam nilai P10 dan P90, yang menunjukkan rentang ketidakpastian yang luas.

- **Cumulative Distribution Function (CDF) Potensi Listrik**



Gambar 7. Kurva Cumulative Distribution Function (CDF) Potensi Listrik

Kurva fungsi distribusi kumulatif (atau CDF) hasil simulasi Monte Carlo untuk potensi tenaga geothermal Lapangan X ditampilkan pada gambar. Kurva ini menggambarkan probabilitas kumulatif potensi tenaga pada nilai tertentu. Batas pesimistis, median, dan optimistis distribusi ditandai oleh titik-titik P90 (37,61 MWe), P50 (65,19 MWe), dan P10 (79,86 MWe), masing-masing. Histogram distribusi potensi listrik dan kurva ini memiliki korelasi langsung; CDF merupakan integral dari histogram. Kurva yang lebih datar menunjukkan distribusi hasil yang lebih luas, sedangkan kurva yang lebih curam di tengah menandakan ketidakpastian yang rendah.

Cadangan geotermal Lapangan X sebesar 65 MWe, menurut data dari publikasi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) tahun 2017 berjudul Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1 (Indonesia's Geothermal Potential, Volume 1). Dengan menggunakan nilai rata-rata (P50) selisih persentase sekitar 0,03%, hasil perhitungan dalam studi ini semakin dekat dengan angka-angka tersebut di bandingkan dengan metode volumetrik[28].

4. SIMPULAN

Studi ini menunjukkan bahwa dalam memperkirakan potensi energi geothermal Lapangan X, metode Monte Carlo lebih unggul dibandingkan metode volumetrik. Hasil simulasi Monte Carlo menunjukkan nilai median (P50) sebesar 65,19 MWe dengan rentang ketidakpastian yang luas antara 37,61 MWe (P90) dan 79,86 MWe (P10), sedangkan metode volumetrik menghasilkan perkiraan sebesar ± 55 MWe. Nilai P50 ini hanya berbeda sekitar 0,03% dari perkiraan resmi sebesar 65 MWe yang disediakan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Menurut analisis sensitivitas, parameter yang memiliki pengaruh terbesar terhadap perkiraan potensial listrik adalah faktor pemulihan dan suhu reservoir. Oleh karena itu, metode

Monte Carlo merupakan alat yang lebih andal untuk menilai dan merencanakan pengembangan sumber daya geotermal di Indonesia, karena tidak hanya menghasilkan hasil yang konsisten dengan pendekatan deterministik, tetapi juga menunjukkan tingkat ketidakpastian dan risiko yang lebih realistis.

Untuk meningkatkan ketepatan perkiraan potensi geotermal, disarankan untuk melakukan penyelidikan lebih lanjut. Hal ini akan melibatkan pengumpulan data geosains yang lebih rinci dan mendalam, terutama mengenai karakterisasi termal, permeabilitas, dan porositas batuan dan fluida. Dengan menambahkan faktor teknis dan ekonomi seperti efisiensi pembangkit listrik dan skenario produksi jangka panjang, metode Monte Carlo juga dapat ditingkatkan. Hal ini akan memastikan bahwa temuan analisis secara akurat mewakili kelayakan proyek secara keseluruhan dan potensi energinya.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. P. Hochstein and S. Sudarman, "History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000," vol. 37, pp. 220–266, 2008, doi: 10.1016/j.geothermics.2008.01.001.
- [2] G. Hiriart *et al.*, "Geothermal Energy," pp. 401–436, 2011.
- [3] G. Britain, "METHODS FOR REGIONAL ASSESSMENT RESOURCES OF GEOTHERMAL Tl," vol. 7, pp. 53–89, 1978.
- [4] R. DiPippo, "Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact."
- [5] M. . Grant, I. . Donaldson, and P. . Bixley, "Geothermal Reservoirs," pp. 1–8, 2011, doi: 10.1016/B978-0-12-383880-3.10001-0.
- [6] B. Suranta, V. Wenov, A. Sofyan, and H. Aka, "Estimasi Potensi Sumber Daya Panasbumi Menggunakan Metode Volumetrik Di Lapangan Patuha," *Indones. J. Energy*, vol. 1, no. December 2020, pp. 37–44, 2020.
- [7] C. E. Hickox, "Use of slim holes with liquid feedzones for geothermal reservoir assessment. Geothermics," 1996.
- [8] B. Toka and M. Parlaktuna, "On the Renewability of Geothermal Resources in Turkey," no. April, pp. 25–29, 2010.
- [9] S. K. Garg and J. Combs, "Geothermics A reformulation of USGS volumetric ' heat in place ' resource estimation method," *Geothermics*, vol. 55, pp. 150–158, 2015, doi: 10.1016/j.geothermics.2015.02.004.
- [10] Z. F. Sarmiento and G. Björnsson, "HIGH-TEMPERATURE RESERVOIRS IN ICELAND AND THE PHILIPPINES," 2007.
- [11] E. G. Systems and U. States, "The Future of Geothermal Energy The Future of Geothermal Energy".
- [12] W. Cumming, "Resource Conceptual Models of Volcano-Hosted Geothermal Reservoirs for Exploration Well Targeting and Resource Capacity Assessment : Construction , Pitfalls and Challenges Resource Conceptual Models of Volcano-Hosted Geothermal Reservoirs for Exploration Well Targeting and Resource Capacity Assessment : Construction , Pitfalls and Challenges," no. October 2016, 2018.
- [13] B. C. F. Williams, M. J. Reed, R. H. Mariner, and U. S. G. Survey, "A Review of Methods Applied by the U . S . Geological Survey in the Assessment of Identified Geothermal Resources," 2008.
- [14] M. Gehringer and V. Loksha, "Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation," *Geotherm. Handb. Plan. Financ. Power Gener.*, 2012, doi: 10.1596/23712.
- [15] G. Axelsson and E. R. Division, "SUSTAINABLE UTILIZATION OF GEOTHERMAL RESOURCES FOR 100 – 300 YEARS," 2004.
- [16] M. Nathenson, "Physical factors determining the fraction of stored energy recoverable from hydrothermal convection systems and conduction-dominated areas. US Geological.pdf."
- [17] G. S. Circular, "Assessment of Geothermal Resources of the United States -1978," vol. 2, 1978.

- [18] S. K. Garg, J. Haizlip, K. K. Bloomfield, A. Kindap, F. S. T. Haklidir, and A. Guney, "A Numerical Model of the Kizildere Geothermal Field , Turkey A Numerical Model of the Kizildere Geothermal Field , Turkey," no. April, 2015.
- [19] S. K. Sanyal, "Cost of geothermal power and factors that affect it," 2004.
- [20] K. N. Chopra, "Modeling of the Geothermal Energy Flow for Optimized Power Conversion based on the Diffusion Equation of Fluid Flow for Porous Rocks," 2019.
- [21] N. E. Authority, "Geothermal reinjection experience," vol. 26, no. 1, pp. 99–139, 1997.
- [22] S. J. Butler, S. K. Sanyal, and A. Robertson-tait, "A NUMERICAL SIMULATION STUDY OF THE PERFORMANCE OF ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEMS," 2004.
- [23] E. B. Layman and S. Soemarinda, "The Patuha vapor-dominated resource West Java, Indonesia," *Proc. 28th Work. Geotherm. Reserv. Eng. Proc.*, no. January, pp. 357–364, 2003, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/268433105%0Ahttps://pangea.stanford.edu/ERE/db/IGASstandard/record_detail.php?id=82
- [24] T. Sriwana, M. J. Van Bergen, J. C. Varekamp, S. Sumarti, and B. Takano, "Geochemistry of the acid Kawah Putih lake , Patuha Volcano , West Java , Indonesia," vol. 97, pp. 77–104, 2000.
- [25] B. T. Handoko, "Resource Assessment of Tompaso Geothermal Field , Indonesia," *United Nation Univ. Geotherm. Train. Program. Reports*, vol. Reports 20, no. 30, pp. 647–674, 2010, [Online]. Available: <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2010-30.pdf>
- [26] Engineeringtoolbox, "specific_heat_solids_embedded."
- [27] rocscience.com, "Rock Density Table," p. 1, 2018.
- [28] Direktorat Panas Bumi, *Buku Panas Bumi*. 2017.

Daftar Simbol

A	=	Luas Area, km ²
h	=	Ketebalan, m
T_i	=	Temperatur Reservoir , °C
T_f	=	Temperatur <i>Cutt-off</i> , °C
Φ	=	Porositas, %
C_r	=	Kapasitas Panas Batuan, J/kg. °C
C_w	=	Kapasitas Panas Fluida, kJ/kg. °C
ρ_r	=	Massa Jenis Batuan, kg/m ³
ρ_w	=	Massa Jenis Fluida, kg/m ³
RF	=	Recovery Factor, %
η	=	Efisiensi Konversi Pembangkit, %
P_f	=	<i>Availability/ plan factor</i> , %
t	=	Waktu ekonomis, tahun
Q_r	=	Energi Panas Dalam Batuan, kJ/kg
Q_w	=	Energi Panas Dalam Fluida, kJ/kg
Q_T	=	Energi Panas Total, kJ/kg
P	=	Potensi Pembangkitan, MWe