

PERHITUNGAN POTENSI CADANGAN PANASBUMI LAPANGAN "X" MENGGUNAKAN DATA EKSPLORASI

Syahda Ahyar Habibirahman, Lestari, dan Bambang Kustono

Universitas Trisakti, Jl. Kyai Tapa No.1, Jakarta Barat, DKI Jakarta, Indonesia

Abstrak

Pada perhitungan potensi cadangan panasbumi Lapangan "X", metode yang digunakan adalah metode volumetrik dan Simulasi Monte Carlo yang merujuk kepada Badan Standar Nasional Indonesia (BSNI) (SNI 13-6482-2000) mengenai Metode Estimasi Potensi Energi Panasbumi. Metode volumetrik menganggap bahwa reservoir sebagai suatu bentuk bangun ruang sehingga volumenya dapat diperkirakan. Sementara itu, metode simulasi Monte Carlo menggunakan bilangan acak sebagai faktor ketidakpastian pada beberapa parameter yang sudah diperoleh dari survei pendahuluan, dengan jenis distribusi yang ditentukan berdasarkan parameter perhitungan. Parameter yang digunakan pada perhitungan diperoleh melalui asumsi dan ada yang merupakan hasil dari kegiatan survei pendahuluan menggunakan peta *magnetotelluric* dan geotermometer berupa data ketebalan, luas, dan temperatur reservoir. Parameter lainnya seperti porositas dan kapasitas panas batuan, temperatur akhir, saturasi air dan uap, energi dalam air dan uap, densitas air dan uap, faktor perolehan, serta umur dan faktor pembangkit yang belum diperoleh dari kegiatan survei pendahuluan diperoleh dari asumsi yang merujuk kepada SNI 13-6482-2000 dan korelasi tabel uap.

Pada metode volumetrik, Lapangan X mempunyai temperatur reservoir 220°C, luas area 7.4 km², dan ketebalan sebesar 1550 m. Selanjutnya, dengan metode simulasi Monte Carlo, reservoir mempunyai nilai temperatur sebesar 220°C untuk nilai yang paling mungkin dan 200-220°C untuk interval nilainya, luas reservoir dengan nilai paling mungkin sebesar 7.4 km² dengan rentang nilai 4-11 km², dan ketebalan paling mungkin sebesar 1550 m dengan rentang nilai 1200-1700 m. Diperoleh besar potensi cadangan energi panasbumi pada Lapangan "X" adalah 36.90 MWe dengan metode volumetrik dan 14.82 untuk metode simulasi Monte Carlo.

Kata kunci: Volumetrik, Monte Carlo, SNI.

Abstract

The method used in this reserve estimation is volumetric, regulated by Badan Standar Nasional Indonesia (BSNI) (SNI 13-6482-2000). This method considers that the reservoir is a form of dimensional space so that its volume can be measured. This type of method can also be used in reserve classes ranging from hypothetical resources up to proven reserves, with parameters used in this calculation obtained through assumptions and those that are the result of preliminary survey activities, which consist of geological (MT maps), geophysics (MT maps), and geochemistry (geotermometer) surveys. Data obtained from preliminary survey activities contains data on thickness, area, and temperature of the reservoir. Other parameters that have not been obtained from preliminary survey activities, such as rock porosity and heat capacity, final temperature, water and steam saturation, internal energy of water and steam, water and steam density, recovery factor, load factor and span and are based on assumptions compiled by BSNI (SNI 13-6482-2000). In addition of using volumetric methods, calculations are also performed using the Monte Carlo simulation method. This method uses random numbers as uncertainty factors in some parameters that have been obtained from the preliminary survey as mentioned above, with the type of distribution determined based on calculation parameters.

With the reservoir temperature of 220°C, area of 7.4 km², & thickness reaches 1550 m, the potential for geothermal reserve at "X" Field based on the volumetric method is 36.90 MWe. Meanwhile, using the Monte Carlo simulation method, the potential reserves at a 90% confidence level are around 47.93 MWe: which has the the most likely reservoir temperature of 220°C with the range of values varies around 200-225°C, reservoir area with the most likely value is 7.5 km² ranging from 4-11 km², and the most likely thickness value is 1550 m with 1200-1700 m for the minimum and maximum values. The calculation results of the geothermal energy reserve potential in the "X" Field are 36.90 MWe using volumetric method and 47.93 for Monte Carlo simulation method.

Keyword: Volumetric, Monte Carlo, SNI

*Penulis untuk korespondensi (*corresponding author*):

E-mail: syahdaahyar@gmail.com

[Tel:+62-812-9698-4839](tel:+62-812-9698-4839)

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki cadangan sumber panasbumi terbesar, yakni sebesar 29.125 GWe. Hal ini disebabkan oleh keberadaan Indonesia secara geografis yang terletak pada daerah vulkanik, sehingga memungkinkan terbentuk dan tersimpannya sumber energi panasbumi. Hingga saat ini, terdapat beberapa lapangan panasbumi yang telah berhasil dikembangkan, di antaranya adalah Sibayak, G. Salak, Kamojang, Darajat, Wayang Windu, Dieng, Sarulla, Lahendong, dan lain-lain di mana jumlah keseluruhan energi yang telah diproduksi sekitar 1900 MW (Status, 1998).

untuk memperoleh informasi mengenai daerah yang prospek menghasilkan panasbumi hingga kemudian dilakukan pemboran guna membuktikan keberadaan energi panasbumi tersebut, diperlukan kegiatan survei. Kegiatan survei ini nantinya akan memberikan gambaran secara terperinci mengenai kemungkinan keberadaan energi panasbumi di suatu lapangan disertai jumlah energi yang terkandung di lapangan tersebut. Survei yang dilakukan ditinjau dari segi geologi, geokimia, dan geofisika. Data yang diperoleh merupakan parameter-parameter yang digunakan untuk menghitung potensi cadangan suatu lapangan, seperti data kedalaman beserta luas reservoir dan temperatur reservoir.

Metode yang digunakan untuk menghitung potensi awal cadangan suatu lapangan panasbumi adalah metode volumetrik dan simulasi Monte Carlo.

II. TEORI DASAR

Panasbumi terbentuk akibat adanya aktivitas fisika dan kimia di yang berada di dalam bumi. Lempeng tektonik menabrak satu sama lain dan mengakibatkan terbentuknya dataran tinggi ataupun patahan/rekahan, di mana proses ini disebut subduksi atau tumbukan. Oleh sebab itu, keberadaan suatu sumber panasbumi dapat diidentifikasi dari adanya kegiatan vulkanik dan/atau tektonik serta dapat pula dilihat dari manifestasinya di permukaan, karena sumber panasbumi yang terlihat di permukaan merupakan minimum potensi cadangan dari keseluruhan cadangan yang berada di dalam reservoir.

Lapangan panasbumi didefinisikan sebagai daerah yang mengindikasikan adanya aktivitas panasbumi di permukaan, atau dapat juga area yang tidak ada aktivitas di permukaan tetapi di bawah permukaan (Saptadji, 2008). Sistem panasbumi adalah bagian-bagian yang termasuk ke dalam sistem hidrologi, termasuk zona recharge dan bagian-bagian outflow dan bagian bawah permukaan. Sementara itu, reservoir panasbumi merupakan bagian dari sistem

panasbumi yang mengindikasikan terdapatnya panas dan zona permeabel yang dapat langsung dieksploitasi. Tanda keberadaan sumber panasbumi juga dapat dilihat langsung di permukaan, baik diakibatkan oleh tekanan maupun ebulisi (pendidihan), yang disebut sebagai manifestasi.

Terdapat beberapa jenis manifestasi panasbumi di permukaan. Di antara manifestasi tersebut, jenis manifestasi yang sering dijumpai adalah air panas dan fumarol. Proses terbentuknya manifestasi ini dikarenakan adanya patahan yang menyebabkan uap maupun air panas yang keluar dari dalam reservoir. Dari hasil manifestasi ini kemudian bisa dijadikan sampel untuk mengetahui temperatur di bawah permukaan agar dapat dilakukan kegiatan eksplorasi lebih lanjut untuk memperoleh parameter-parameter yang akan digunakan dalam perhitungan potensi cadangan energi panasbumi.

II.1 Sistem Panasbumi

Sistem panasbumi dibedakan menjadi lima, yaitu sistem hidrotermal konvektif, sistem geopressured, sistem sedimentary, sistem radiogenik, dan sistem hot dry rock (Lund, 2007).

Sementara itu, reservoir panasbumi dikelompokkan berdasarkan temperturnya, yakni (Hochstein, 1990):

- Reservoir panasbumi bertemperatur rendah, yaitu reservoir yang mengandung fluida dengan temperatur lebih rendah dari 125°C.
- Reservoir panasbumi bertemperatur sedang, yaitu reservoir yang mengandung fluida dengan temperatur antara 125-225°C.
- Reservoir panasbumi bertemperatur tinggi, yaitu reservoir yang mengandung fluida dengan temperatur lebih besar dari 225°C.
- Sistem panasbumi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis entalpinya, yakni sistem entalpi rendah, sistem entalpi sedang, dan sistem entalpi tinggi. Namun, yang digunakan sebagai dasar perhitungan adalah pengelompokkan reservoir berdasarkan temperturnya.

II.2 Jenis dan Sifat Fluida Panasbumi

Jenis dan sifat fluida panas bumi mencakup volume spesifik dan densitas fluida energi dalam, serta entalpi dan panas laten.

Volume spesifik fluida pada suatu fase fluida merupakan antara volume dengan massa dari fluida tersebut. Satuan volume spesifik dinotasikan dengan m³/kg. Besar dari volume spesifik air dan uap tergantung pada besarnya tekanan dan temperatur, untuk kemudian dikorelasikan dengan tabel uap.

Sedangkan densitas merupakan perbandingan antara massa dengan volume fluida tersebut. Satuan dari densitas adalah kg/m^3 .

Energi dalam (u) merupakan salah satu parameter yang menyatakan besar panas yang terkandung di dalam suatu fase per satuan massa. Satuan dari energi dalam dinyatakan dalam kJ/kg .

Entalpi didefinisikan sebagai jumlah dari energi dalam dengan energi yang dihasilkan oleh tekanan. Entalpi dapat bernilai positif maupun negatif. Apabila entalpi bernilai positif, maka terjadi penyerapan energi, sedangkan entalpi bernilai negatif apabila terjadi pelepasan energi. Yang digunakan sebagai standar untuk menghitung jumlah panas adalah air, karena untuk menaikkan temperatur sebesar 1°F untuk tiap 1 lb air diperlukan panas sebesar 1 BTU. Satuan dari entalpi dinyatakan dengan kJ/kg .

II.3 Sifat Batuan Panasbumi

Sifat batuan panasbumi terdiri dari densitas batuan, saturasi, porositas, permeabilitas, dan kapasitas panas

Porositas merupakan perbandingan antara volume rongga-rongga maupun rekahan-rekahan batuan dengan volume batuan, yang dinyatakan sebagai fraksi dari volume total batuan. Porositas batuan reservoir panasbumi dibedakan menjadi dua, yakni porositas rekahan dan porositas antarbutir/matriks batuan, di mana hanya porositas matriks batuan yang dapat diukur di laboratorium.

Permeabilitas suatu batuan merupakan ukuran batuan untuk mengalirkan fluida yang berpengaruh pada kecepatan alir fluida di dalam pori maupun batuan rekah alami. Permeabilitas umumnya dinyatakan dalam satuan mD , sedangkan dalam bidang panasbumi biasa dinyatakan dalam m^2 .

Kapasitas panas merupakan banyaknya energi panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur padatan, dalam hal ini batuan panasbumi, sebesar 1°C . Kapasitas panas yang terdapat pada batuan, bersama-sama dengan massa total dan temperaturnya menunjukkan berapa panas yang terkandung di dalam batuan tersebut.

II.4 Kegiatan Eksplorasi

Kegiatan eksplorasi panasbumi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui keberadaan air atau uap panas di dalam reservoir yang memiliki permeabilitas baik dan mendukung. Di antara beberapa kegiatan eksplorasi, terdapat kegiatan survei untuk memperoleh gambaran yang lebih terperinci mengenai keadaan geologi di permukaan maupun di bawah permukaan.

Kegiatan eksplorasi dibedakan menjadi beberapa bagian, yakni eksplorasi pendahuluan eksplorasi lanjut, serta pemboran eksplorasi. Tujuan dari kegiatan eksplorasi pendahuluan dimaksudkan untuk menemukan daerah yang berprospek untuk dikembangkan menjadi lapangan panasbumi yang ditunjukkan dari adanya tanda-tanda di permukaan (manifestasi), serta untuk memperoleh gambaran geologi dari daerah tersebut. Setelah dilakukan eksplorasi pendahuluan, tahapan selanjutnya dari kegiatan eksplorasi pada lapangan panasbumi adalah kegiatan eksplorasi lanjut/rinci, atau bisa. Survei yang dilakukan terdiri dari survei geologi, geokimia, dan geofisika, di mana survei ini bertujuan untuk:

- Memperoleh informasi yang lebih terperinci mengenai kondisi geologi di permukaan dan bawah permukaan
- Mengidentifikasi daerah yang kemungkinan besar mengandung sumber panasbumi.

Untuk membuktikan keberadaan energi panasbumi di bawah permukaan, perlu dilakukan pemboran eksplorasi. Pemboran eksplorasi pada lapangan panasbumi dilakukan apabila data dari geologi, geofisika, geokimia, dan geofisika yang diperoleh dari kegiatan survei menunjukkan bahwa pada lapangan tersebut memiliki nilai ekonomis untuk dikembangkan.

II.5 Klasifikasi Potensi Energi Panasbumi

Pengklasifikasian sumber daya dan cadangan energi panasbumi dibedakan berdasarkan hasil dari kajian ilmu-ilmu kebumihian. Hasil kajian ilmu kebumihian tersebut kemudian dihubungkan dengan sumber daya dan cadangan energi panasbumi.

Cadangan panasbumi dikelompokkan menjadi 3 bagian, yaitu kelas cadangan mungkin (*possible*), terduga (*probable*), dan terbukti (*proven*). Perhitungan potensi energi pada kelas cadangan mungkin dilakukan berdasarkan hasil penyelidikan geologi, geokimia, dan/atau landaian suhu sehingga dapat menggambarkan model konseptual panasbumi dan mengestimasi dimensi dan karakteristik fluida beserta batuan reservoir (BSNI, 2000). Kelas cadangan terduga merupakan kelas cadangan yang potensi energinya dihitung berdasarkan hasil penyelidikan geologi, geokimia, dan geofisika, dan/atau sumur landaian suhu beserta minimum satu sumur eksplorasi. Selanjutnya, Kelas cadangan terbukti merupakan kelas cadangan yang paling meyakinkan, karena potensi energinya dihitung berdasarkan hasil penyelidikan geologi, geokimia, dan geofisika, dan/atau sumur landaian suhu serta sudah terdapat tiga sumur eksplorasi, di mana minimal satu sumurnya mampu mengalirkan fluida panasbumi.

III. METODOLOGI

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya potensi energi panasbumi. Metode yang digunakan dalam kegiatan tugas akhir ini adalah metode volumetrik dan simulasi Monte Carlo. Metode volumetrik merupakan metode estimasi potensi energi panasbumi mulai dari kelas sumber daya hipotetis sampai dengan kelas cadangan terbukti, sedangkan metode simulasi Monte Carlo memperkirakan potensi cadangan panasbumi berdasarkan distribusi nilai cadangannya.

III.1 Metode Volumetrik

Prinsip metode volumetrik adalah menganggap bahwa reservoir panasbumi merupakan reservoir yang berbentuk segi empat (kotak), dengan volume yang dapat dihitung dengan mengalikan luas area yang diperkirakan mengandung fluida panasbumi dengan ketebalannya. Dalam metode volumetrik, besarnya potensi energi sumber daya atau cadangan dapat diperkirakan berdasarkan kandungan energi panas di dalam reservoir. Kandungan energi panas di dalam reservoir merupakan jumlah keseluruhan panas yang terkandung di dalam batuan dan fluida panasbumi.

III.1.1 Perhitungan Metode Volumetrik

Perhitungan mengenai besarnya potensi energi listrik yang dapat dimaksimalkan dapat dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

Perhitungan mengenai besarnya potensi energi listrik yang dapat dimaksimalkan dapat dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Menghitung kandungan energi yang pada keadaan awal (*initial*)

$$H_{ei} = A \cdot h \cdot [(1 - \Phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_i + \Phi(S_L \cdot \rho_L \cdot u_L + S_v \cdot \rho_v \cdot u_v)_i] \quad (III.1)$$

2. Menghitung kandungan energi pada keadaan akhir (*final*)

$$H_{ef} = A \cdot h \cdot [(1 - \Phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_f + \Phi(S_L \cdot \rho_L \cdot u_L + S_v \cdot \rho_v \cdot u_v)_f] \quad (III.2)$$

3. Menghitung energi maksimal yang dapat dimanfaatkan

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef} \quad (III.3)$$

4. Menghitung energi panasbumi yang dapat dimaksimalkan pada kenyataannya:

$$H_{de} = R_f \cdot H_{th} \quad (III.4)$$

5. Menghitung besarnya cadangan yang dapat dimanfaatkan dalam kurun waktu t tahun

$$H_{re} = \frac{H_{de}}{t \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (III.5)$$

6. Menghitung besarnya potensi listrik panasbumi, yakni energi listrik yang dapat dibangkitkan selama periode t tahun

$$H_{el} = \frac{H_{de} \cdot \eta}{t \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 1000} \quad (III.6)$$

Di mana:

- A = luas reservoir, m²
- h = ketebalan reservoir, m
- Φ = porositas batuan, %
- Q_r = energi panas batuan, kJ
- ρ_r = densitas batuan, kg/m³
- S_i = saturasi air, %
- ρ_L = densitas air, kg/m³
- S_v = saturasi uap, %
- ρ_v = densitas uap, kg/m³
- c_r = kapasitas panas batuan, kJ/kg°C
- H_{ei} = kandungan energi panas pada keadaan awal, kJ
- T_i = temperatur awal reservoir, °C
- H_{ef} = kandungan energi panas pada keadaan akhir, kJ
- T_f = temperatur akhir, °C
- H_{th} = energi maksimal yang dapat dimanfaatkan, kJ
- H_{de} = energi yang dapat dimanfaatkan pada kenyataannya, kJ
- R_f = recovery factor, %
- H_{re} = cadangan yang dapat dimanfaatkan dalam kurun waktu t tahun, MWth
- H_{el} = energi listrik yang dapat dibangkitkan selama periode t tahun, MWe
- η = faktor konversi listrik, %
- t = umur pembangkit listrik, tahun

III.2 Metode Simulasi Monte Carlo

Metode simulasi Monte Carlo, khususnya pada bidang panasbumi, merupakan metode pendekatan secara probabilistik yang digunakan untuk memperkirakan besar potensi cadangan panasbumi suatu lapangan. Metode ini dilakukan berdasarkan distribusi kemungkinan dari tiap variabel yang dijadikan parameter perhitungan (Kalos dan Withlock, 2008). Apabila dibandingkan dengan metode yang menghasilkan nilai tunggal (seperti volumetrik), metode ini lebih disukai karena mempertimbangkan aspek ketidakpastian, kompleksitas, serta keberagaman dari kondisi reservoir panasbumi. Selanjutnya, perhitungan dilakukan sebanyak jumlah iterasi yang diinginkan. Hasil yang diperoleh berupa nilai yang dianalisis berdasarkan tingkat kemungkinan keberadaan cadangan panasbumi, dengan beberapa parameter yang digunakan parameter memiliki rentang tertentu dan berada pada probability distribution function/fungsi distribusi probabilitas (PDF) yang berjenis distribusi segitiga.

Distribusi segitiga merupakan salah satu jenis PDF yang memiliki fungsi densitas berbentuk segitiga. Jenis distribusi ini terdiri atas tiga buah nilai: nilai minimum (a), nilai yang paling mungkin/most likely (c), serta nilai maksimum (b) (Rubinstein 1981)

III.2.1 Perhitungan Metode Simulasi Monte Carlo

Pada perhitungan menggunakan Microsoft excel, nilai acak dimasukkan dengan memasukkan rumus formula bar, di mana nilai tersebut berkisar antara 0-1 untuk kemudian dikalikan dengan variabel-variabel yang memiliki fungsi distribusi probabilitas. Dengan sudah dilakukannya kegiatan survei geokimia, geofisika, dan geologi, maka beberapa parameter yang digunakan dalam metode ini, seperti luas sebaran, ketebalan, serta temperatur reservoir memiliki fungsi distribusi probabilitas berjenis distribusi segitiga. Sementara itu, parameter lainnya menggunakan asumsi yang disusun oleh Badan Standar Nasional Indonesia (BSNI) (SNI 13-6482-2000)

Pada jenis distribusi segitiga, rumus yang digunakan untuk menghitung nilai tiap parameter untuk tiap iterasinya adalah:

$$M = \frac{X_{mode} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (III.7)$$

1. Apabila bilangan acak lebih kecil atau sama dengan M:

$$X = X_{min} + (X_{max} - X_{min})[(RN.M)^{0.5}] \quad (III.8)$$

2. Apabila bilangan acak lebih besar atau sama dengan M:

$$X = X_{min} + (X_{max} - X_{min})\{1 - [(1 - RN)(1 - M)]^{0.5}\} \quad (III.9)$$

Setelah diperoleh nilai untuk tiap parameter, perhitungan dilanjutkan dengan menghitung kandungan panas total.

1. Panas yang terkandung di dalam batuan:

$$Q_r = A \cdot h[\rho_r \cdot c_r(1 - \Phi)(T_i - T_f)] \quad (III.10)$$

2. Panas yang terkandung di uap:

$$Q_v = A \cdot h[\rho_{vi} \cdot \Phi(1 - S_l)(u_{vi} - u_{lf})] \quad (III.11)$$

3. Panas yang terkandung di air:

$$Q_w = A \cdot h[\rho_{li} \cdot S_l \cdot \Phi(u_{li} - u_{lf})] \quad (III.12)$$

4. Kandungan panas total:

$$Q_t = Q_r + Q_v + Q_w \quad (III.13)$$

Langkah yang terakhir adalah menghitung potensi energi yang dapat dihasilkan. Rumus yang digunakan adalah:

$$P = \frac{Q_t \cdot R_f \cdot \eta}{F \cdot t} \quad (III.14)$$

Di mana:

- M = gradien
- X_{mode} = nilai paling mungkin
- X_{min} = nilai minimum
- X_{max} = nilai maksimum

- RN = random number/bilangan acak
- Q_v = energi panas uap, kJ
- Q_w = energi panas air, kJ
- Q_t = energi panas total, kJ
- P = potensi energi yang dapat dihasilkan, MWe
- F = kapasitas pembangkit, %

III.3 Penentuan Parameter

Perolehan parameter yang dipergunakan di dalam perhitungan potensi cadangan energi panas bumi dibagi ke dalam tiga bagian, yaitu parameter yang diperoleh dari kegiatan survei yang terdiri atas survei geologi, geofisika, dan geokimia, parameter yang diperoleh dari korelasi tabel, serta parameter yang diperoleh dari asumsi yang merujuk kepada SNI 13-6482-2000.

Parameter yang diperoleh dari kegiatan adalah ketebalan, luas, dan temperatur reservoir. Nilai dari ketebalan reservoir Lapangan X adalah sebesar 1550 m dengan nilai minimum 1200 m dan nilai maksimum 1700 m. Nilai dari luas reservoir adalah 7.4 km² dengan nilai minimum 4 km² dan 11 km² dengan nilai maksimum. Temperatur reservoir yang diperoleh dari kegiatan survei geokimia adalah sebesar 220°C dengan nilai minimum dan maksimum sebesar 200 dan 225°C.

Parameter yang diperoleh dari korelasi tabel uap serta tabel permeabilitas relatif adalah densitas, energi dalam, dan saturasi pada keadaan akhir. Dengan korelasi tabel uap, densitas air dan uap pada suhu temperatur awal reservoir 220°C dan suhu akhir 180°C sebesar 11.65 kg/m³ untuk uap dan 840.33 kg/m³ untuk air. Kemudian, dengan menggunakan korelasi tabel uap dapat pula ditentukan nilai energi dalam air (u_f) pada keadaan awal sebesar 940.79 kJ/kg, energi dalam air pada keadaan akhir sebesar 761.91 kJ/kg, energi dalam uap (u_v) pada keadaan awal sebesar 2601.3 kJ/kg, dan energi dalam uap pada keadaan akhir sebesar 2582.8 kJ/kg. Selanjutnya, dengan tabel permeabilitas relatif, diperoleh saturasi air pada keadaan akhir adalah 30% dan saturasi uap pada keadaan akhir adalah sebesar 5%.

Parameter yang merupakan asumsi yang merujuk kepada asumsi SNI 13-6482-2000 diperlihatkan pada tabel III.1 di bawah ini.

Tabel III.1 Asumsi Nilai Parameter Tingkat Cadangan Mungkin (BSNI, 2000)

Parameter	Temp. sedang (125-225 °C)
Saturasi air (%)	80

Tabel III.1 Asumsi Nilai Parameter Tingkat Cadangan Mungkin (Lanjutan) (BSNI, 2000)

Parameter	Temp. sedang (125-225 °C)
Porositas batuan (%)	10
Kapasitas panas batuan (kJ/kg°C)	0.9
Densitas batuan (kg/m ³)	2.65 x 10 ³
Umur proyek (tahun)	30
Faktor konversi listrik (%)	10
Faktor perolehan (%)	25

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Hasil Perhitungan Potensi Cadangan Panasbumi Menggunakan Metode Volumetrik

Berikut ini merupakan hasil perhitungan potensi cadangan panasbumi menggunakan metode volumetrik.

- Menentukan parameter yang meliputi luas daerah, temperatur reservoir, temperatur *cut-off* (final), porositas air dan uap, saturasi air dan uap, densitas batuan, daya hantar panas batuan, densitas uap dan air, dan energi dalam uap dan air.
- Memasukkan parameter luas daerah, temperatur reservoir, temperatur *cut-off* (final), porositas air dan uap, saturasi air dan uap, densitas batuan, daya hantar panas batuan, densitas uap dan air, dan energi dalam uap dan air ke dalam rumus perhitungan cadangan.
- Menghitung kandungan energi di dalam reservoir pada keadaan awal (T_i) menggunakan rumus III.13:

$$\begin{aligned}
 H_{ei} &= A \cdot h \cdot [(1 - \Phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_i \\
 &\quad + \Phi(S_L \cdot \rho_L \cdot u_L \\
 &\quad + S_v \cdot \rho_v \cdot u_v)_i] \\
 &= (4700000)(1550)[(1 \\
 &\quad - 0.1)(2.65 \times 10^3)(0.9)(220) \\
 &\quad + 0.1((0.7)(850.34)(940.79) \\
 &\quad + (0.3)(11.62)(2601.3))]
 \end{aligned}$$

$$= 6.062 \times 10^{15} \text{ kJ}$$

- Menghitung kandungan energi di dalam reservoir pada keadaan akhir (T_f) menggunakan rumus III.14:

$$\begin{aligned}
 H_{ef} &= A \cdot h \cdot [(1 - \Phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_f \\
 &\quad + \Phi(S_L \cdot \rho_L \cdot u_L \\
 &\quad + S_v \cdot \rho_v \cdot u_v)_f] \\
 &= (4700000)(1550)[(1 \\
 &\quad - 0.1)(2.65 \times 10^3)(0.9)(180) \\
 &\quad + 0.1((0.3)(887.31)(761.92) \\
 &\quad + (0.05)(5.16)(2582.8))] \\
 &= 4.665 \times 10^{15} \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

- Menghitung maksimum energi yang dapat dimanfaatkan (sumber daya) menggunakan rumus III.15:

$$\begin{aligned}
 H_{th} &= H_{ei} - H_{ef} \\
 &= 6.062 \times 10^{15} - 4.665 \times 10^{15} \\
 &= 1.397 \times 10^{15} \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

- Menghitung energi panas yang pada kenyataannya dapat diambil (cadangan panasbumi) menggunakan rumus III.16. Apabila cadangan dinyatakan dalam kJ, maka besarnya cadangan ditentukan sebagai berikut:

$$H_{de} = R_f \times H_{th}$$

Di mana $R_f = 25\%$

$$\begin{aligned}
 H_{de} &= (0.25)(1.397 \times 10^{15}) \\
 &= 3.491 \times 10^{14} \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

- Apabila cadangan dinyatakan dalam satuan MWth, maka besarnya cadangan ditentukan sebagai berikut (menggunakan rumus III.17):

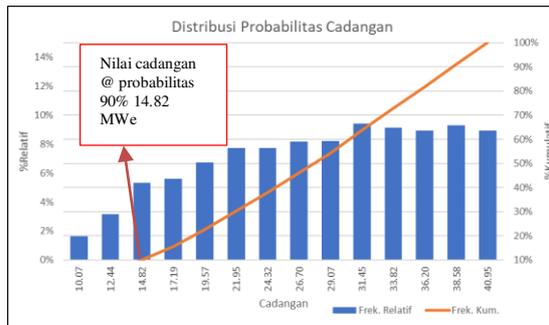
$$\begin{aligned}
 H_{re} &= \frac{H_{de}}{t \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \\
 &= \frac{3.491 \times 10^{14}}{30 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \\
 &= 369.041 \text{ MWth}
 \end{aligned}$$

- Menghitung besarnya potensi listrik panasbumi, yakni besarnya energi listrik yang dapat dibangkitkan selama periode waktu t tahun (dalam satuan Mwe) menggunakan rumus III.18:

$$\begin{aligned}
 H_{el} &= \frac{H_{de} \cdot \eta}{t \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 1000} \\
 &= \frac{(3.491 \times 10^{14})(0.1)}{30 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \\
 &= 36.904 \text{ MWe}
 \end{aligned}$$

IV.2 Hasil Perhitungan Potensi Cadangan Panasbumi Menggunakan Metode Simulasi Monte Carlo

Selanjutnya diperoleh hasil perhitungan potensi cadangan panasbumi menggunakan metode simulasi Monte Carlo yang ditampilkan dalam bentuk histogram pada gambar IV.1 di bawah ini



Gambar IV.1 Histogram Distribusi Probabilitas Cadangan

IV.3 Pembahasan

Tujuan dari dilakukannya penelitian tugas akhir kali ini adalah untuk mengetahui besar potensi cadangan yang dapat dimaksimalkan pada suatu lapangan panasbumi, mengetahui parameter-parameter yang berpengaruh terhadap besar potensi cadangan tersebut, serta tahap-tahap yang harus dilakukan untuk menghitung potensi cadangan lapangan panasbumi menggunakan metode volumetrik dan simulasi Monte Carlo.

Setelah diperoleh semua parameter yang digunakan dalam perhitungan potensi cadangan energi panasbumi dengan metode volumetrik, dapat diperkirakan bahwa potensi cadangan energi panasbumi untuk kelas cadangan mungkin sebesar 36.90 MWe pada lapangan X. Sementara itu, untuk perhitungan yang menggunakan simulasi Monte Carlo, besar potensi cadangan panasbumi pada tingkat kepercayaan sebesar 90% adalah sekitar 14.82 MWe.

III. KESIMPULAN

Kesimpulan dari kegiatan tugas akhir kali ini di antaranya:

1. Ketebalan reservoir Lapangan X adalah sebesar 1550 meter, dengan nilai minimum dan maksimumnya sebesar 1200 dan 1700 m.
2. Luas dari reservoir Lapangan X adalah sebesar 7.4 km², dengan nilai minimum dan maksimumnya sebesar 4 dan 11 km².
3. Besar potensi cadangan Lapangan X yang dihitung dengan metode volumetrik adalah sebesar 36.90 MWe.

4. Potensi cadangan yang dihitung dengan simulasi Monte Carlo adalah sebesar 14.82 MWe pada tingkat kemungkinan 90%.

5. Pada kelas cadangan mungkin, hasil dari perhitungan masih belum dapat dipastikan keakuratannya, karena kegiatan pemboran belum dilakukan, sehingga data yang diperoleh masih belum lengkap dan beberapa di antaranya berdasarkan asumsi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadiran Allah SWT berkat rahmat-Nya tulisan ini dapat diselesaikan. Banyak terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak Dr. Ir. Alfiat Anugrahadi, MS selaku Dekan Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi Universitas Trisakti, Bapak Ir. Abdul Hamid, MT selaku Ketua Program Studi Teknik Perminyakan FTKE Universitas Trisakti, Ibu Ir. Lestari Said, M.T, selaku pembimbing utama, serta Bapak Ir. Bambang Kustono selaku pembimbing pendamping penulis pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Astri, A. (2015): Penentuan parameter dan perhitungan cadangan panasbumi lapangan "ast" dengan metode simulasi monte carlo, *Seminar Nasional Cendekiawan*, 241-247.
2. Badan Standardisasi Nasional (2000). Angka parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi.
3. Grant M.A. dan Bixley, P.F. (2011): *Geothermal reservoir engineering*, hal. 5-27, Academic Press, San Diego.
4. Hafsari S.W. dan Rading, A. (2017): Potensi cadangan panasbumi dengan metoda volumetrik pada sumur saka-1 lapangan panasbumi X kabupaten lembata nusatenggara timur, *Jurnal OFFSHORE*, 1, 1, 1-8.
5. Hochstein P. M. dan P.R.L. Browne. (2000): Surface manifestations of geothermal systems with volcanic heat sources, *Encyclopedia of Volcanoes*, 835-836.
6. Kementerian ESDM (2017): Buku potensi panasbumi jilid 2, Kementerian ESDM, Jakarta.
7. Putriyana, L. dan Soekarno, H. (2015): Simulasi pengembangan lapangan panasbumi lainea, *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, 14, 117-134.
8. Saptadji, N.M. (2008): *Teknik panasbumi*, hal. II-1-V-33, Departemen Teknik Perminyakan ITB, Bandung.
9. Sarmiento, Z. dan Steingrímsson, B. (2007): Computer programme for resource assessment and risk evaluation using monte carlo simulation, *Geothermal Development in Central America*.

10. Saumundsson K. (2009): *Geothermal systems in global perspective*, 2.
11. Sutopo (2014): Reservoir engineering, program studi magister “teknik panasbumi” fakultas teknik pertambangan dan perminyakan itb.
12. Shah, M. dkk. (2018): Using monte carlo simulation to estimate geothermal resource in dholera geothermal field, gujarat, india, *Multiscale and Multidisciplinary Modelling, Experiments, and Design*, **1**, 83-95.