

Model Simulasi Sistem Dinamik Estimasi Potensi Energi Panas Bumi Metode Volumetrik Studi Kasus Gunung X

Rianza Zulmy Alhamri¹, Ashafidz Fauzan Dianta²

Teknik Informatika, Politeknik Kediri

Jl. Mayor Bismo No 27 Kediri

Email : rianza.z.alhamri@gmail.com¹, ashafidz.fauzan@gmail.com²

Abstrak— Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat model estimasi potensi energi panas bumi menggunakan kerangka kerja Sistem Dinamik. Perhitungan estimasi potensi energi panas bumi yang digunakan pada penelitian ini adalah metode volumetrik. Metode Sistem Dinamik digunakan karena mampu mengakomodir hubungan sebab akibat dari setiap variabel secara kompleks. Sehingga diharapkan model yang terbentuk berdasarkan Sistem Dinamik mampu merepresentasikan keadaan real dari potensi energi panas bumi. Model estimasi potensi energi panas bumi yang telah dihasilkan selanjutnya disimulasikan secara normal menggunakan lingkungan pembangkitan *binary cycle*. Sedangkan penerapan skenario menggunakan dua skenario yaitu sistem pembangkitan *flash steam* dan *dry steam*. Untuk melakukan verifikasi serta validasi model, data yang digunakan diperoleh dari data geologi Gunung X. Model estimasi potensi energi panas bumi yang dihasilkan pada penelitian ini terbukti terverifikasi dan valid. Dari hasil verifikasi dan validasi diperoleh tingkat error sebesar 0.75% dimana masih dalam batas error yang diperbolehkan yaitu $\leq 5\%$. Dan besar error variance model adalah sebesar 0.76%, nilai tersebut masih dalam batas error variance yang diperbolehkan yakni $\leq 30\%$. Lebih lanjut, penelitian ini menemukan kesimpulan bahwa penggunaan skenario pembangkitan *binary cycle* memiliki optimasi yang maksimal dalam memanfaatkan energi panas bumi dibandingkan sistem pembangkitan *flash steam* maupun *dry steam*.

Kata Kunci— Potensi Energi Panas Bumi, Metode Volumetrik, Sistem Dinamik.

I. PENDAHULUAN

Energi panas bumi merupakan energi terbarukan yang ramah lingkungan dimana energinya dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit tenaga listrik. Energi panas bumi menjadi sumber daya alternatif menggantikan sumber daya fosil yang semakin menipis. Indonesia sebagai wilayah yang dilalui cincin api, memiliki potensi energi panas bumi terbesar di dunia. Yang menjadi pertanyaannya adalah apakah benar energi panas bumi yang dihasilkan di Indonesia mampu memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Untuk mengetahui hal tersebut diperlukan model untuk melakukan estimasi potensi energi panas bumi dimana nilai estimasi tersebut digunakan sebagai rujukan potensi produksi listrik yang akan dihasilkan.

Salah satu model estimasi potensi energi panas yang terkandung di bawah permukaan bumi adalah metode volumetrik [3]. Metode volumetrik umum digunakan setelah diperoleh data-data hasil survey terpadu meliputi survey geologi, geokimia, dan geofisika yang dilakukan pada saat survey regional di kawasan prospek. Metode volumetrik dilakukan untuk memberikan hipotesis nilai sumber daya sampai nilai cadangan energi terbukti. Prinsip dasar metode

volumetrik adalah menganggap reservoir panas bumi sebagai suatu bentuk kotak yang volumenya dapat dihitung dengan mengalikan luas sebaran dan ketebalannya.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyusun model dari sistem estimasi potensi energi panas bumi serta mensimulasikan model tersebut. Kemudian menganalisa hasil simulasi berdasarkan skenario-skenario yang telah dibuat serta menarik kesimpulan. Penelitian ini berdasarkan pada penggunaan data di bawah kewenangan Dinas ESDM Provinsi Jawa Timur, Jl Tidar No 123, Surabaya. Diharapkan penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan acuan untuk instansi-instansi yang terkait dengan pengembangan serta industri energi panas bumi. Memberikan kontribusi terhadap disiplin ilmu pengetahuan untuk kepentingan masyarakat pada umumnya.

II. SISTEM DINAMIK

A. Definisi Sistem Dinamik

Sistem dinamik adalah suatu metode yang digunakan untuk mendeskripsikan, memodelkan, dan mensimulasikan suatu sistem yang dinamis (dari waktu ke waktu terus berubah) [4]. Didalam sistem dinamik diajarkan bagaimana berpikir secara sistem. Artinya adalah dalam menyelesaikan suatu masalah tidak dilihat pada satu pokok bagian saja, tetapi dilihat semua pengaruhnya terhadap semua yang berhubungan dengan masalah tersebut.

Jay Forrester mendefinisikan Sistem dinamika adalah pendekatan untuk memahami perilaku sistem yang kompleks dari waktu ke waktu [4][7]. Ini berkaitan dengan umpan balik internal dan waktu tunda yang mempengaruhi perilaku seluruh sistem. Selain itu Miftahol Arifin juga mendefinisikan Metode sistem dinamis adalah metode pendekatan eksperimental yang mendasari pengamatan kenyataan untuk memahami tingkah laku sistem.

B. Struktur dan Hubungan dalam Model

Ciri-ciri Sistem Dinamik yaitu mencakup lintasan waktu dan sebuah mekanisme waktu (clock mechanism) menggerakkan waktu, sehingga variabel status berubah saat waktu berubah suatu model system dinamis dibentuk karena adanya hubungan sebab-akibat (causal) yang memengaruhi struktur di dalamnya baik secara langsung antar dua struktur, maupun akibat dari berbagai hubungan yang terjadi pada sejumlah struktur, hingga membentuk umpan-balik (causal loop). Struktur umpan-balik ini merupakan blok pembentuk model yang diungkapkan melalui lingkaran-lingkaran hubungan sebab-akibat dari variabel-variabel yang melingkar secara tertutup.



Gambar 1 Hubungan Sebab Akibat

Ada 2 macam hubungan kausal, yaitu hubungan sebab-akibat positif dan hubungan sebab-akibat negatif. Ada 2 macam umpan-balik, yaitu umpan-balik positif (growth) dan umpan – balik negatif (goal seeking).

C. Tujuan Sistem Dinamik

Tujuan pemodelan dan simulasi menggunakan kerangka Sistem Dinamik adalah:

1. Mengatasi permasalahan manajemen yang umum seperti fluktuasi inventori, ketidakstabilan tenaga kerja, penurunan pangsa pasar suatu perusahaan dan lain-lain.
2. Sebagai pendukung keputusan dalam merancang kebijakan-kebijakan yang efektif.
3. Untuk mengetahui perilaku sistem nyata yang kompleks.

D. Karakteristik Sistem Dinamik

Karakteristik Sistem Dinamik adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan model simulasi dalam menyelesaikan suatu masalah.
2. Bentuk model diformulasikan secara matematis.
3. Perhitungan simulasi dilakukan secara bertahap dengan interval waktu satu tahun.
4. Bentuk bangun model dapat berupa diagram alir.
5. Sistem dinamik mempunyai struktur tertentu yang terdiri dari sejumlah loop-loop feedback yang saling berinteraksi dan masing-masing loop memiliki satu atau lebih level.

E. Langkah-langkah Membuat Simulasi Sistem Dinamik

Berikut ini adalah langkah-langkah membuat simulasi lingkungan Sistem Dinamik

1. Identifikasi masalah.
2. Tentukan faktor-faktor yang dominan terhadap permasalahan.
3. Menelusuri terbentuknya loop umpan balik dan interaksi antara loop satu dengan yang lainnya.
4. Melakukan perhitungan simulasi.
5. Menentukan validitas dari model yang dibuat.

6. Menerapkan kebijakan tertentu dalam melakukan modifikasi terhadap model.
7. Melakukan simulasi berikutnya dengan model yang mengalami perubahan.
8. Menarik kesimpulan.

III. CAUSAL LOOP DIAGRAM

Untuk mensimulasikan potensi energi panas bumi maka dibuat rancangan diagram sebab-akibat atau *causal loop diagram* (CLD). Pada diagram ini dicantumkan variabel-variabel yang terlibat dalam studi kasus ini dan hubungan sebab-akibat antar variabel-variabel tersebut. Diagram ini juga berfungsi untuk memberikan gambaran kondisi kekinian dan lingkup dari studi kasus yang akan disimulasikan.

Berikut ini merupakan variabel-variabel yang signifikan mempengaruhi potensi energi panas bumi.

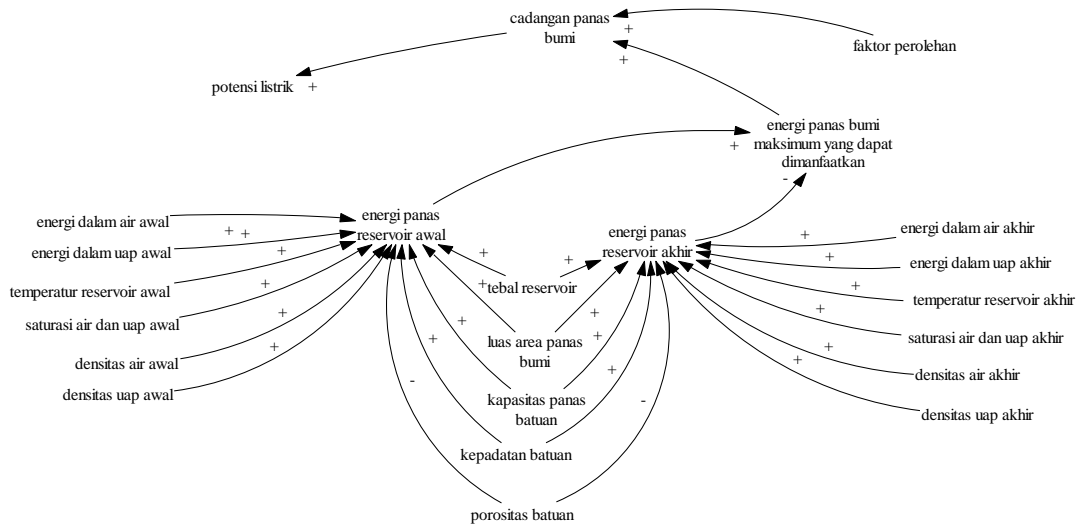
- a. Energi panas pada *reservoir* keadaan awal merupakan energi panas yang terkandung pada *reservoir* saat awal ditemukan (initial state).
- b. Energi panas pada *reservoir* keadaan akhir merupakan energi yang terkandung pada *reservoir* saat keadaan setelah mengalami manipulasi.

Sedangkan pada tabel 1 berikut ini dijelaskan pemetaan variabel untuk memperoleh tujuan yang diharapkan.

TABEL I
PENETAPAN VARIABEL SIGNIFIKAN

Variabel	Parameter yang mempengaruhi
Energi panas pada reservoir	- Luas area panas bumi - Tebal reservoir - Temperatur reservoir - Kepadatan batuan - Kepadatan air dan uap - Kapasitas panas batuan - Saturasi air dan uap akhir - Energi dalam air dan uap
Energi panas bumi maksimum yang dapat dimanfaatkan	- Energi panas reservoir awal - Energi panas reservoir akhir
Cadangan panas bumi	- Energi panas bumi maksimum - Faktor perolehan

CLD dibuat berdasarkan dari parameter serta variabel yang telah diidentifikasi sebelumnya. Model estimasi potensi energi panas bumi menggunakan metode volumetrik yang divisualisasikan dengan diagram sebab-akibat (CLD) dapat dilihat pada gambar 2.

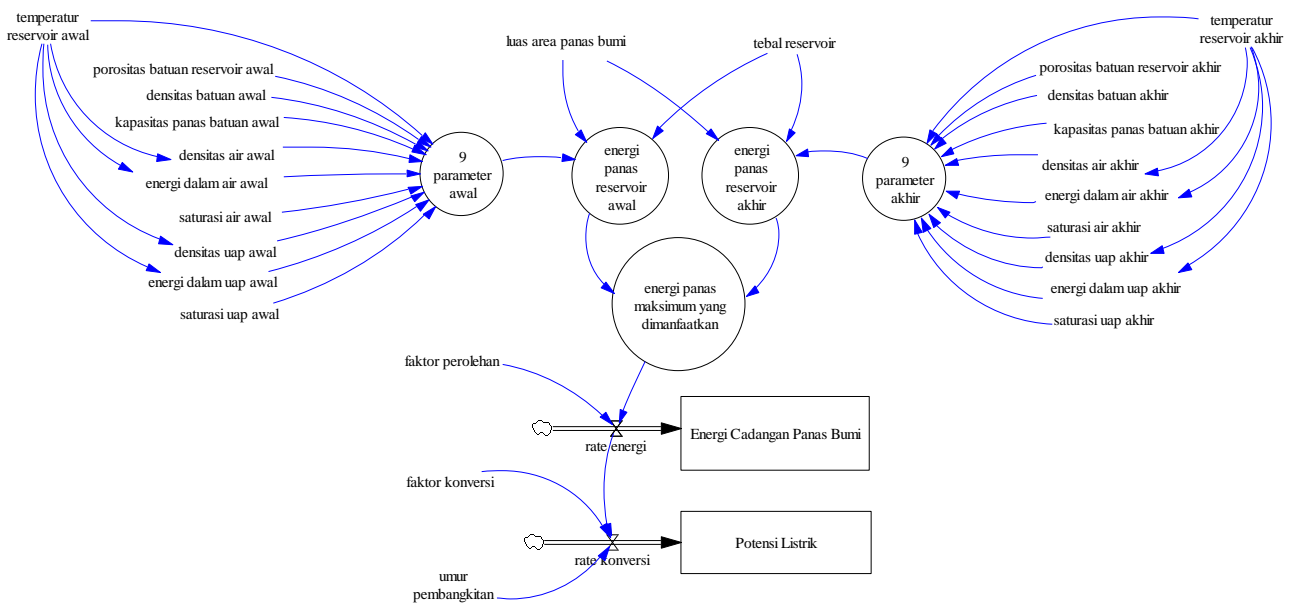


Gambar 2 Causal Loop Diagram Estimasi Potensi Energi Panas Bumi Metode Volumetrik

IV. STOCK FLOW DIAGRAM

Setelah causal loop diagram dibuat, digunakan juga rancangan stock flow diagram (SFD) untuk menjadi dasar bagi model yang nantinya akan disimulasikan. SFD ini dibuat berdasarkan gambaran kondisi yang direpresentasikan melalui CLD. Stock flow diagram (SFD) digunakan untuk mengetahui aliran yang terjadi. SFD yang dirancang untuk pembuatan model ini dapat dilihat pada gambar 3.

Berdasarkan gambar 3, temperatur reservoir selain menjadi parameter pada auxiliary kandungan energi panas, temperatur reservoir juga memiliki peran dalam menentukan 4 parameter lain meliputi densitas air, energi dalam uap, dan yang terakhir adalah energi dalam uap. Sehingga nilai ke-4 parameter tersebut akan berubah sesuai dengan parameter temperatur reservoir. Kandungan energi panas maksimum yang dapat dimanfaatkan dipengaruhi oleh 2 auxiliary. Nilai dari potensi listrik menjadi nilai rate, kemudian dimasukkan ke dalam level untuk mengetahui nilai dinamisnya.



Gambar 3 Stock Flow Diagram Estimasi Potensi Energi Panas Bumi Metode Volumetrik

V. PERSAMAAN MODEL

Setelah rancangan model yakni SFD telah selesai dibuat, maka langkah berikutnya adalah memasukkan persamaan matematis ke dalam variabel pada rancangan model. Berikut ini akan dijelaskan mengenai persamaan pada masing-masing

variabel dari rancangan model yang dapat dilihat pada gambar 3.

A. Persamaan pada Variabel

1) Kandungan energi panas bumi

Berikut ini merupakan persamaan dasar untuk mencari kandungan panas yang terdapat di dalam reservoir [3][5][6].

$$H_e = A h \{(1-\Phi) \rho_r c_r T + \Phi (\rho_L U_L S_L + \rho_v U_v S_v)\} \dots(1)$$

- Dimana:
- H_e = Kandungan energi panas (kJ)
 - A = Luas area panas bumi (m^2)
 - h = Tebal reservoir (m)
 - Φ = Porositas batuan reservoir (fraksi)
 - T = Temperatur reservoir ($^{\circ}C$)
 - ρ_r = densitas batuan (kg/m³)
 - ρ_L = densitas air (kg/m³)
 - ρ_v = densitas uap (kg/m³)
 - S_L = Saturasi air (fraksi)
 - S_v = Saturasi uap (fraksi)
 - U_L = Energi dalam air (kJ/kg)
 - U_v = Energi dalam uap (kJ/kg)
 - C_r = kapasitas panas batuan (kJ/kg $^{\circ}C$)

Dari rumus 1, untuk memudahkan proses masukan persamaan maka rumus 1 dipecah menjadi dua, yakni pada bagian $A \cdot h$ dan $\{(1-\Phi) \rho_r c_r T + \Phi (\rho_L U_L S_L + \rho_v U_v S_v)\}$. Tabel 2 merupakan persamaan yang akan digunakan pada simulasi Sistem Dinamik dengan auxiliary 9 parameter.

TABEL II
PERSAMAAN 9 PARAMETER

Nama	9 parameter
Persamaan	$((1-(\text{porositas batuan reservoir}/100)) \cdot \text{densitas batuan} \cdot \text{kapasitas panas batuan} \cdot \text{temperatur reservoir}) + ((\text{porositas batuan reservoir}/100) \cdot ((\text{densitas air} \cdot \text{energi dalam air} \cdot (\text{saturasi air}/100)) + (\text{densitas uap} \cdot \text{energi dalam uap} \cdot (\text{saturasi uap}/100))))$
Satuan	kJ

Rumus 1 bagian $\{(1-\Phi) \rho_r c_r T + \Phi (\rho_L U_L S_L + \rho_v U_v S_v)\}$ ditambahkan pada persamaan 9 parameter sehingga dapat dihitung terlebih dahulu. Kemudian pada variabel kandungan energi panas bumi hanya menghitung variabel $A \cdot h$ nilai persamaan 9 parameter yang dapat dilihat pada tabel 3.

TABEL III
PERSAMAAN KANDUNGAN ENERGI PANAS RESERVOIR

Nama	Energi panas reservoir
Persamaan	Luas area panas bumi * tebal reservoir * 9 parameter
Nilai awal	Luas area panas bumi * tebal reservoir * 9 parameter
Satuan	Kj

2) Energi cadangan panas bumi

Sebelum diperoleh energi cadangan panas bumi yang kenyataannya dapat diambil, sebelumnya dihitung dulu energi panas maksimal yang dapat dimanfaatkan dengan rumus sebagai berikut [3][5][6].

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef} \dots(2)$$

Dimana:

- H_{th} = energi panas bumi maksimum yang dapat dimanfaatkan (kJ)
- H_{ei} = Kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan awal, (kJ)
- H_{ef} = Kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan akhir, (kJ)

H_{ei} diperoleh dari rumus 1, dimana temperatur reservoir masih dalam keadaan normal (initial). Sedangkan H_{ef} merupakan perhitungan rumus 1 pada keadaan akhir dimana temperatur reservoir sudah termanipulasi (cut off). Tabel 4 merupakan persamaan auxiliary energi panas maksimum yang dapat dimanfaatkan, yang digunakan dalam simulasi Sistem Dinamik.

TABEL IV
PERSAMAAN ENERGI PANAS MAKSIMUM YANG DAPAT DIMANFAATKAN

Nama	Energi Panas Maksimum yang dapat Dimanfaatkan
Persamaan	Energi Panas Awal – Energi Panas Akhir
Satuan	kJ

Menghitung energi panas yang pada kenyataannya bisa diambil (cadangan panas bumi) diperoleh berdasarkan presentasi faktor perolehan dari energi panas maksimum yang dapat dimanfaatkan. Apabila cadangan dinyatakan dalam satuan kJ, maka besarnya cadangan ditentukan sebagai berikut.

$$H_{de} = R_f \cdot H_{th} \dots(3)$$

Dimana:

- H_{de} = energi panas bumi maksimum yang dapat diambil ke permukaan (cadangan panas bumi), (kJ)
- R_f = faktor perolehan, (fraksi)
- H_{th} = energi panas bumi maksimum yang dapat dimanfaatkan (kJ)

Berdasarkan rumus 3 maka dapat dijelaskan rumus yang digunakan seperti pada tabel 5 berikut.

TABEL V
PERSAMAAN CADANGAN ENERGI PANAS BUMI

Nama	Energi Cadangan Panas Bumi
Persamaan	Kandungan Energi Panas*(faktor perolehan/100)
Nilai awal	Kandungan Energi Panas
Satuan	kJ

3) Potensi daya listrik

Menghitung besarnya potensi listrik panas bumi, yaitu besarnya energi listrik yang dapat dibangkitkan selama periode waktu t tahun (dalam satuan MWe) dapat dihitung dengan persamaan 4. Persamaan ini berdasarkan standarisasi nasional Indonesia [3][5][6].

$$H_{el} = \frac{H_{de} \cdot \eta}{t \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1000} \dots(4)$$

Dimana:

- H_{el} = potensi listrik panas bumi (MWe)
- H_{de} = energ panas bumi maksimum yang dapat diambil ke permukaan (kJ)
- t = lama waktu (umur) pembangkit listrik (tahun)
- μ = faktor konversi listrik (fraksi)

Dari rumus 4 maka persamaan yang ada pada simulasi Sistem Dinamik menjadi seperti yang ada pada tabel 6 berikut ini.

TABEL VI
PERSAMAAN POTENSI LISTRIK

Nama	Potensi Listrik
Persamaan	Energi Cadangan Panas Bumi*(faktor konversi listrik/100)/ umur pembangkitan*365*24*3600*1000
Nilai awal	Energi Cadangan Panas Bumi
Satuan	MWe

B. Asumsi Nilai pada Variabel Model

Metode volumetrik memerlukan 12 parameter untuk menyelesaikan estimasinya. Ke-12 parameter tersebut diperoleh berdasarkan hasil kajian terpadu geologi, geokimia, dan geofisika yang telah dilakukan serta berbagai asumsi sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) [3][5][6].

- a. Luas Area (A) diperoleh berdasarkan kajian survey MT.
- b. Tebal Reservoir (h) diperoleh dari inversi 2D MT, minimal 500 m dan maksimal 1500m
- c. Porositas batuan berdasarkan asumsi angka parameter porositas batuan SNI 03-5012-1999 dimana Indonesia dalam klasifikasi angka 10%.
- d. Densitas batuan berdasarkan uji laboratorium serta asumsi berdasarkan SNI 03-5012-1999 dimana minimal sebesar 2370 kg/m³ dengan maksimal sebesar 2600 kg/m³ untuk temperatur reservoir sedang sampai tinggi.
- e. Kapasitas panas batuan didasarkan pada angka asumsi SNI 03-5012-1999 sebesar antara 0.9 kJ/kg °C samapai dengan 1 kJ/kg °C. untuk reservoir ber-temperatur sedang sampai tinggi.
- f. Temperatur reservoir awal (initial) berdasarkan perhitungan geotermometer fluida yaitu minimal sebesar 206 °C dan maksimal sebesar 235 °C.
- g. Temperatur reservoir akhir (cut off) berdasarkan angka asumsi SNI 03-5012-1999.
- h. Nilai densitas air, densitas uap, energi dalam air, dan energi dalam uap sesuai dengan besar temperatur reservoir dimana nilainya bisa dilihat dalam tabel Saturated Water and Steam.
- i. Faktor perolehan sesuai dengan SNI 13-6171-1999 sebesar 25%.
- j. Faktor konversi listrik bernilai 10% berdasarkan SNI 13-6171-1999.
- k. Waktu pembangkitan yang diatur dalam Undang-Undang di Indonesia yaitu selama 30 tahun.

Model yang akan disimulasikan merupakan data survey terpadu geologi, geokimia, dan geofisika dari suatu gunung bernama X dengan mempertimbangkan asumsi-asumsi yang telah dijelaskan.

VI. HASIL SIMULASI

Setelah model selesai dibuat, maka langkah berikutnya adalah melakukan simulasi dengan menggunakan model tersebut. Pada tabel 7 akan dijelaskan angka2 parameter berdasarkan data dari gunung X, dimana nilai temperatur cut off diasumsikan menggunakan sistem pembangkitan binary cycle (entalpi sedang) sehingga berdasarkan SNI 03-5012-1999, temperatur reservoir akhir (cut off) sebesar 120°C.

TABEL VII
ANGKA PARAMETER SISTEM PEMBANGKITAN BINARY CYCLE

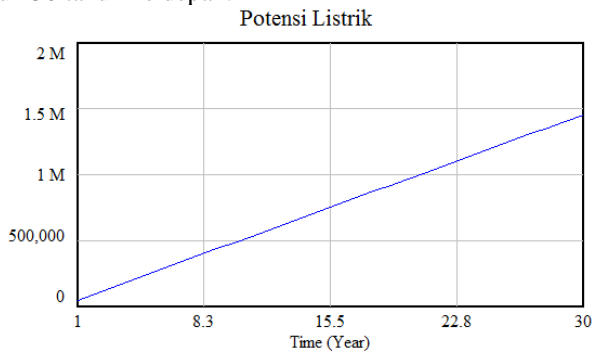
Parameter	Satuan	Keadaan	
		Awal	Akhir
Luas Area	m ²	9200000	
Tebal reservoir	m	700	
Porositas batuan	%	10	
Saturasi air	%	100	30
Saturasi uap	%	0	70
Densitas batuan	kg/m ³	2450	
Kapasitas panas batuan	kJ/kg °C	1	
Temperatur batuan	°C	220	120
Densitas air	kg/m ³	840.8	942.9
Energi dalam air	kJ/kg	938.9	504.5
Densitas uap	kg/m ³	11.519	1.129
Energi dalam uap	kJ/kg	2601.3	2529.1
Faktor perolehan	%	25	
Faktor konversi listrik	%	10	
Umur pembangkitan	tahun	30	
HASIL			
Energi panas dalam reservoir	kJ	3.63129E+015	1.79721E+015
Energi panas maksimum yang dapat dimanfaatkan	kJ	1.83498E+015	
Cadangan Energi Panas	kJ	4.58745E+015	
Daya listrik per tahun	MWe	48.488	

Gambar 4 merupakan hasil level potensi listrik untuk 10 tahun ke depan yang bisa diproduksi oleh pembangkitan di gunung X.

Time (Year)	1	2	3	4	5	6
"Potensi Listrik" Runs:	Current					
Potensi Listrik	48,488	96,977	145,466	193,955	242,444	290,933
Time (Year)	7	8	9	10		
"Potensi Listrik" Runs:	Current					
Potensi Listrik	339,422	387,911	436,400	484,889		

Gambar 4 Hasil Simulasi Potensi Listrik Sistem Pembangkitan Binary Cycle Gunung X

Sedangkan Gambar 5 merupakan hasil simulasi potensi listrik di gunung X dalam bentuk diagram grafik kartesius untuk 30 tahun ke depan.



Gambar 5 Grafik Potensi Listrik Sistem Pembangkitan Binary Cycle Gunung X

VII. VERIFIKASI DAN VALIDASI MODEL

Model yang telah dibuat harus diuji verifikasi untuk mengetahui apakah terdapat kesalahan pada model baik secara teknis tools dan persamaan. Model yang telah dibuat dan digunakan untuk simulasi tersebut telah dapat disimulasikan dengan baik dan tidak ditemukan error secara teknis. Persamaan yang telah ditambahkan pada masing-masing variabel juga telah dicek ulang dan tidak ditemukan persamaan yang tidak sesuai.

Setelah model lolos uji verifikasi maka tahap selanjutnya adalah melakukan uji validasi. Uji validasi bertujuan untuk menentukan sesuai tidaknya model yang dibuat dengan kondisi sebenarnya. Uji validasi model ditentukan melalui dua parameter yakni *error rate* seperti pada rumus 5 dan *error variance* seperti pada rumus 6 [1].

$$E1 = \text{Error Rate} \leq 5\%$$

$$E1 = \frac{|Rata\ rata\ Simulasi - Rata\ rata\ Data|}{Rata\ rata\ Data} \quad \dots(5)$$

$$E2 = \text{Error Variance} \leq 30\%$$

$$E2 = \frac{|Standart\ Deviasi\ Simulasi - Standart\ Deviasi\ Data|}{Standart\ Deviasi\ Data} \quad \dots(6)$$

Untuk uji validasi hanya digunakan data dummy pada 10 periode saja. Dan tabel 8 merupakan hasil uji validasi model.

TABEL VIII
HASIL UJI VALIDASI MODEL

Data	Simulasi
48.52	48.488
97.04	96.977
145.56	145.466
194.08	193.955
242.6	242.444
291.12	290.933
339.64	339.422
388.16	387.911
436.68	436.400
485.2	484.889

Nilai E1	
rata-rata data simulasi	264.856
rata-rata data asli	266.86
E1	0.064%

Nilai E2	
standar deviasi simulasi	145.799
standar deviasi data asli	146.902
E2	0.064%

Model yang telah dibuat tersebut memiliki tingkat error sebesar 0.75% yang masih dalam batas error yang diperbolehkan yaitu $\leq 5\%$. Dan besar error variance model adalah sebesar 0.76%, nilai tersebut masih dalam batas error variance yang diperbolehkan yakni $\leq 30\%$.

VIII. SKENARIO

Pengukuran estimasi potensi energi panas bumi menggunakan metode volumetrik dilakukan oleh peneliti pada saat tahap survey cadangan terduga. Dalam satu kali survey terpadu meliputi survey geologi, geokimia, dan geofisika membutuhkan biaya mencapai 1 milyar rupiah (Sumber: Dinas ESDM Provinsi Jawa Timur). Untuk itu sebelum melakukan survey cadangan terduga, perlu dilakukan estimasi spekulatif agar resiko survey bisa ditekan. Dengan menggunakan simulasi yang dikembangkan ini, estimasi spekulatif bisa diakomodir nilai parameternya untuk kemudian bisa diperkirakan skenarionya pada simulasi estimasi energi panas bumi menggunakan metode volumetrik.

Skenario yang dikembangkan meliputi 2 skenario yaitu yang pertama skenario yang menggunakan temperatur reservoir cut off hasil sistem pembangkitan flash steam dan yang kedua menggunakan temperatur reservoir cut off hasil sistem pembangkitan dry steam. Untuk skenario pembangkitan sistem flash steam, menggunakan asumsi temperatur reservoir cut off batuan sebesar 180 °C dimana memiliki karakteristik nilai entalpi tinggi. Sedangkan skenario pembangkitan sistem dry steam, menggunakan asumsi temperatur reservoir cut off batuan sebesar 150 °C dimana memiliki karakteristik nilai entalpi sedang.

A. Skenario Sistem Pembangkitan Flash Steam

Pada skenario sistem pembangkitan flash steam, dilakukan estimasi potensi listrik yang ada pada gunung X apabila menggunakan sistem pembangkitan flash steam. Digunakan temperatur reservoir initial sesuai dengan data yang ada pada gunung X yaitu 220 °C, sedangkan temperatur reservoir cut off menggunakan asumsi pembangkitan flash steam yaitu sebesar 180 °C [2]. Untuk parameter lainnya menyesuaikan dengan data pada gunung X seperti yang telah dijelaskan pada tabel 9.

TABEL IX
ANGKA PARAMETER SISTEM PEMBANGKITAN FLASH STEAM

Parameter	Satuan	Keadaan	
		Awal	Akhir
Luas Area	m ²	9200000	
Tebal reservoir	m	700	
Porositas batuan	%	10	
Saturasi air	%	100	30
Saturasi uap	%	0	70
Densitas batuan	kg/m ³	2450	
Kapasitas panas batuan	kJ/kg °C	1	
Temperatur batuan	°C	220	180
Densitas air	kg/m ³	840.8	870.4
Energi dalam air	kJ/kg	938.9	828.5
Densitas uap	kg/m ³	11.519	7.104
Energi dalam uap	kJ/kg	2601.3	2591.8
Faktor perolehan	%	25	
Faktor konversi listrik	%	10	
Umur pembangkitan	tahun	30	
HASIL			
Energi panas dalam reservoir	kJ	3.63129E+015	2.69256E+015
Energi panas maksimum yang dapat dimanfaatkan	kJ	9.39638E+014	
Cadangan Energi Panas	kJ	2.3491E+014	
Daya listrik per tahun	MWe	24.829	

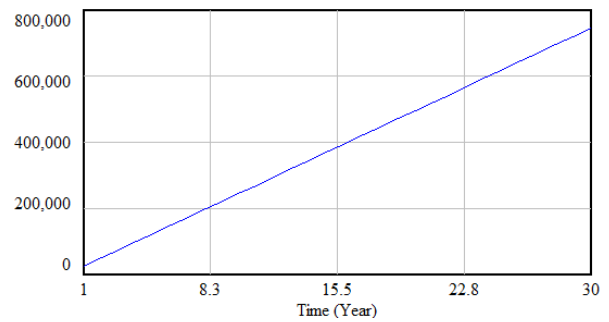
Gambar 6 merupakan hasil simulasi untuk potensi listrik pada 10 tahun kedepan dengan menggunakan sistem pembangkitan flash steam pada gunung X

Time (Year)	1	2	3	4	5	6
"Potensi Listrik" Runs:	Current	49,659	74,489	99,319	124,148	148,978
"Potensi Listrik" Runs:	Current	173,808	198,638	223,468	248,297	

Gambar 6 Hasil Simulasi Sistem Pembangkitan Flash Steam Gunung X

Sedangkan Gambar 7 merupakan hasil simulasi dalam bentuk diagram grafik kartesius untuk sistem pembangkitan flash steam di gunung X pada periode 30 tahun ke depan.

Potensi Listrik



Gambar 7 Grafik Potensi Listrik Sistem Pembangkitan Flash Steam Gunung X

B. Skenario Sistem Pembangkitan Dry Steam

Pada skenario sistem pembangkitan dry steam, dilakukan estimasi potensi listrik yang ada pada gunung X yang diasumsikan menggunakan sistem pembangkitan flash steam untuk memperoleh tenaga listriknya. Digunakan temperatur reservoir initial sesuai dengan data yang ada pada gunung X yaitu 220 °C, sedangkan temperatur reservoir cut off menggunakan asumsi pembangkitan dry steam yaitu sebesar 150 °C [2]. Untuk parameter lainnya menyesuaikan dengan data pada gunung X seperti yang dijelaskan pada tabel 10.

TABEL IX
ANGKA PARAMETER SISTEM PEMBANGKITAN DRY STEAM

Parameter	Satuan	Keadaan	
		Awal	Akhir
Luas Area	m ²	9200000	
Tebal reservoir	m	700	
Porositas batuan	%	10	
Saturasi air	%	100	30
Saturasi uap	%	0	70
Densitas batuan	kg/m ³	2450	
Kapasitas panas batuan	kJ/kg °C	1	
Temperatur batuan	°C	220	150
Densitas air	kg/m ³	840.8	916.7
Energi dalam air	kJ/kg	938.9	633.0
Densitas uap	kg/m ³	11.519	2.567
Energi dalam uap	kJ/kg	2601.3	2559.3
Faktor perolehan	%	25	
Faktor konversi listrik	%	10	
Umur pembangkitan	tahun	30	
HASIL			
Energi panas dalam reservoir	kJ	3.63129E+015	2.2451E+015
Energi panas maksimum yang dapat dimanfaatkan	kJ	1.38709E+015	

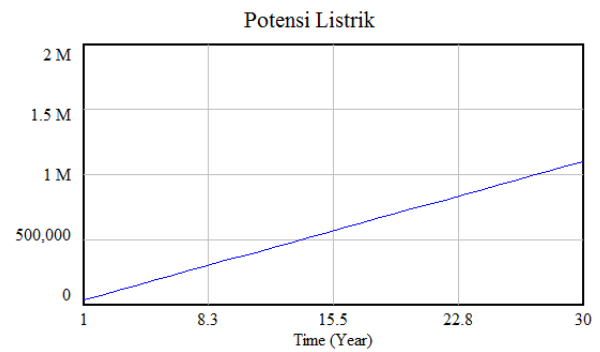
Cadangan Energi Panas	kJ	3.46773E+015
Daya listrik per tahun	MWe	36.653

Hasil simulasi potensi listrik pada gunung X dengan skenario menggunakan sistem pembangkitan dry steam untuk 10 tahun ke depan bisa dilihat pada Gambar 8.

Time (Year)	1	2	3	4	5
"Potensi Listrik" Runs:	Current				
Potensi Listrik	36,653	73,307	109,961	146,614	183,268
Time (Year)	6	7	8	9	10
"Potensi Listrik" Runs:	Current				
Potensi Listrik	219,922	256,575	293,229	329,883	366,537

Gambar 8 Hasil Simulasi Sistem Pembangkitan Dry Steam Gunung X

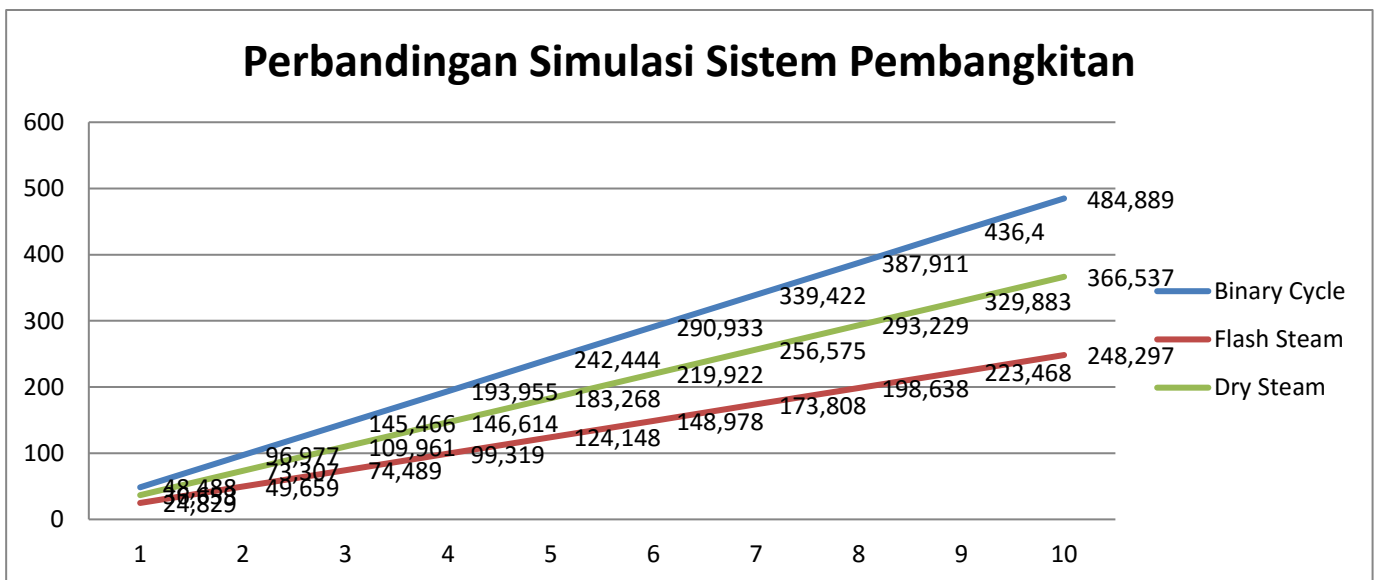
Sedangkan Gambar 9 meruakan grafik kartesius dari hasil simulasi potensi listrik sistem pembangkitan menggunakan dry steam pada gunung X pada 30 tahun ke depan.



Gambar 9 Grafik Potensi Listrik Sistem Pembangkitan Dry Steam Gunung X

IX. HASIL DAN TEMUAN

Gambar 10 merupakan grafik perbandingan dari setiap penggunaan sistem pembangkitan pada gunung X yang telah disimulasikan menggunakan Sistem Dinamik untuk 10 tahun ke depan.



Gambar 10 Perbandingan Hasil Simulasi Potensi Listrik di Gunung X

Bisa kita lihat berdasarkan Gambar 10 bahwa pemanfaatan energi panas bumi untuk membangkitkan tenaga listrik pada gunung X, akan bisa optimal apabila menggunakan sistem pembangkitan Binary Cycle. Untuk tahun pertama, sistem pembangkitan Binary Cycle; secara estimasi menggunakan simulasi Sistem Dinamik; mampu untuk menghasilkan potensi listrik sebesar 48.488 MWe, serta untuk 10 tahun kedepan mampu memproduksi listrik secara akumulasi sebesar 484.889. Hasil tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan sistem pembangkitan lain seperti sistem pembangkitan Flash Steam dan Dry Steam.

X. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Telah berhasil dibuat model serta simulasi dari estimasi potensi energi panas bumi menggunakan metode

volumetrik dengan pendekatan kerangka kerja Metode Sistem Dinamik dimana model tersebut telah terverifikasi dan valid.

- Gunung X dengan temperatur reservoir sebesar 220 °C dan menggunakan asumsi temperatur reservoir cut off bernilai 120 °C mampu menghasilkan cadangan energi panas bumi yang besar, dimana bila dikonversi menjadi tenaga listrik mampu menghasilkan minimal 48 MWe per tahun.
- Menggunakan studi kasus di gunung X, telah disimulasikan beberapa skenario potensi listrik tenaga panas bumi dimana potensi listrik tertinggi menggunakan sistem pembangkitan binary cycle, yang kedua menggunakan sistem pembangkitan dry steam, dan yang terendah menggunakan sistem pembangkitan flash steam.

4. Penggunaan sistem pembangkitan binary cycle pada gunung X memiliki optimasi yang maksimal dalam memanfaatkan energi panas bumi. Hal ini dikarenakan gunung X memiliki temperatur reservoir yang tinggi sehingga apabila menggunakan sistem pembangkitan selain binary cycle yaitu flash steam dan dry steam, maka dalam dalam memanfaatkan energi panas bumi tidak mampu membangkitkan tenaga listrik secara optimal

REFERENSI

- [1] Barlas, Y. (1996). *Formal aspects of model validity and validation in system dynamics*. System Dynamics Review, 12, 183-210.
- [2] Grant Ingram and John Pye. 2010. Steam Tables Calculated Using Freesteam. <http://freesteam.sf.net>
- [3] Standar Nasional Indonesia. 1999. Metode Estimasi Potensi Energi Panas Bumi. SNI 13-6171-1999
- [4] Richardson, G. P. (2013). System Dynamics. (S. I. Gass, & M. C. Fu, Eds.) *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, 1519-1522.
- [5] Standar Nasional Indonesia. 1999. SNI 03-5012-1999
- [6] Standar Nasional Indonesia. 2000. Angka Parameter dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi. SNI 13-6482-2000
- [7] Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. New York: Jeffrey J. Shelstad.