

KAJIAN POTENSI ENERGI PANAS BUMI SEBAGAI ALTERNATIF PEMBANGKIT ENERGI LISTRIK TERBARUKAN: SEBUAH *FRAMEWORK* SISTEM DINAMIK

Rinanza Z. Alhamri¹⁾, Erma Suryani²⁾

^{1, 2} Sistem Informasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Sukolilo, Jl. Raya ITS, Surabaya, Jawa Timur 60111
E-mail : rinanza.z.alhamri@gmail.com¹⁾, erma@is.its.ac.id²⁾

Abstract

Government of Indonesia has a target to increase the geothermal power plant installed capacity up to 10.000MW in 2025. But until 2014, it still reaches 1.739MW. If the target in 2015 is 4.000 MW, 2016 is 4.600 MW, and 2025 is 10.000MW, it is reasonable for public to have many questions for the target. But in other side, the government stays optimistic to execute the target confidently. This paper tries to evaluate the condition of geothermal energy developments as an alternative of renewable power plants using a modelling and simulation of System Dynamics. The evaluation is focused how to improve the success of geothermal energy industry according to the technical, economics, geographical, infrastructure, and social aspect for improving the gaining of geothermal installed capacity and power production. The study has been successful to make a model of the geothermal energy harnessing system as an alternative of renewable power plants. According to the result of the simulation projection, the existing condition can not be able to support the development of geothermal industry in accordance with the target 10.000 MW in 2025. It has been developed four scenarios to increase geothermal installed capacity and power production such as improving the bidding success, improving investment success, accelerating the production phase, and increasing installed capacity. The best scenario is increasing installed capacity by increasing the geothermal electricity price where in 2025 the geothermal installed capacity gains up to 3.458 MW, 34.5% of the target with the power production gains up to 13.263 GWh.

Abstrak

Pemerintah Indonesia menargetkan di tahun 2025 kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga panas bumi mencapai 10.000 MW. Namun kenyatannya sampai tahun 2014, kapasitas terpasang masih mencapai 1.739 MW. Dengan target tahun 2015 sebesar 4.000 MW, tahun 2016 sebesar 4.600 MW, dan tahun 2025 sebesar 10.000 MW maka wajar bila sebagian kalangan mulai menyangsikan target di tahun 2025 akan diraih. Penelitian ini mencoba untuk mengkaji kondisi pengembangan potensi energi panas bumi sebagai alternatif pembangkit listrik terbarukan dengan menggunakan pemodelan dan simulasi Sistem Dinamik. Kajian difokuskan bagaimana untuk meningkatkan kesuksesan proyek pemanfaatan potensi energi panas bumi berdasarkan aspek teknis, ekonomi, infrastruktur, geografis, dan sosial sehingga bisa meningkatkan perolehan kapasitas terpasang dan produksi listrik kedepannya. Pada penelitian ini telah berhasil dibuat model sistem pemanfaatan potensi energi panas bumi sebagai alternatif pembangkit energi listrik terbarukan. Berdasarkan hasil simulasi dengan proyeksi sampai tahun 2050, kondisi saat ini masih belum mampu untuk mencapai kapasitas terpasang panas bumi dengan terget 10.000 MW di tahun 2025. Telah dikembangkan empat skenario untuk meningkatkan kapasitas terpasang dan produksi listrik panas bumi meliputi meningkatkan kesuksesan lelang, meningkatkan kesuksesan investasi, mempercepat tahap produksi, dan meningkatkan kapasitas terpasang. Skenario terbaik adalah skenario meningkatkan kapasitas terpasang dengan meningkatkan harga jual listrik panas bumi dimana di tahun 2025 kapasitas terpasang mencapai 3.458 MW, sebesar 34.5% dari target dengan produksi listrik 13.263 GWh.

Kata kunci: sistem dinamik, energi panas bumi, pembangkit listrik

1. PENDAHULUAN

Diperkirakan Indonesia memiliki potensi energi panas bumi yang mampu membangkitkan listrik sebesar 28.910 MW dimana setara dengan

kurang lebih 40% potensi energi panas bumi di dunia [1]. Dengan potensi energi panas bumi yang melimpah pemerintah bermaksud untuk memanfaatkan semaksimal mungkin energi panas bumi yang ada sebagai salah satu

pembangkit listrik terbarukan sebagai alternatif energi fosil yang kian langka, mahal, dan merusak lingkungan [2]. Sebagai langkah kongkrit, pemerintah telah membuat *roadmap* Percepatan Pembangunan Pembangkit Listrik 10.000 MW Tahap II sebagai Pendukung Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia (MP3EI) untuk memajukan ekonomi nasional [2]. Pemerintah menetapkan rencana peningkatan kapasitas terpasang energi panas bumi secara bertahap, dari 4.000 MW di tahun 2015, 4.600 MW di tahun 2016, dan 10.000 MW di tahun 2025. [1][3][4].

Permasalahannya adalah apakah benar target pemerintah akan terpenuhi untuk ke depannya. Sampai tahun 2013, kapasitas terpasang energi panas bumi masih mencapai 1.345 MW dan 1.739 MW di tahun 2014 [5]. Dengan target 10.000 MW di tahun 2025 diperkirakan akan sulit diraih. Meskipun begitu pemerintah masih tetap optimis dengan target *roadmap* energi panas bumi yang telah dicanangkan [2][18]. Sampai tahun 2015 telah beroperasi 14 pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) dan ada lebih dari 20 proyek panas bumi yang telah berjalan dimana bekerjasama dengan pihak swasta [19][20]. Sampai saat ini pemerintah masih tetap aktif melaksanakan pelelangan terhadap wilayah kerja panas bumi (WKP) lainnya.

Untuk menjawab pertanyaan tersebut maka penelitian ini mencoba untuk bagaimana mengembangkan model pemanfaatan potensi energi panas bumi sebagai alternatif pembangkit energi listrik terbarukan dan mensimulasikannya. Lalu bagaimana membuat skenario untuk meningkatkan kinerja model. Yang terakhir adalah skenario apa yang terbaik dan signifikan dalam meningkatkan kinerja model.

Digunakan metode pemodelan dan simulasi menggunakan Sistem Dinamik dimana mampu mengakomodir peristiwa sebab akibat dengan mempertimbangkan unsur eksternal maupun internal dari perilaku sistem yang kompleks [15]. Dengan menggunakan metode pemodelan dan simulasi, analisis bisa dilakukan secara cepat, tanpa banyak menggunakan tempat, dan murah dibandingkan implementasi secara langsung pada sistem yang sebenarnya [6][15].

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan model pemanfaatan potensi energi panas bumi sebagai alternatif pembangkit energi listrik terbarukan menggunakan pendekatan Sistem Dinamik. Selanjutnya mengembangkan skenario yang dapat meningkatkan kinerja model serta mengetahui skenario terbaik dalam meningkatkan kinerja model.

Telah dilakukan penelitian terkait oleh para peneliti sebelumnya. Jalal dan Bodger [11] melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengevaluasi produksi listrik di Selandia Baru. Terdapat tiga loop utama meliputi *loop* pembangunan pembangkit tenaga listrik, *loop* interaksi investasi dan pasar, dan *loop* keputusan investasi. Ada tiga skenario yang memiliki hasil memuaskan meliputi variabel energi terbarukan, partisipasi konsumen, dan tingkat keberhasilan penemuan energi.

Kemudian Rasjadin dkk. [12] melakukan penelitian untuk membentuk model kebutuhan listrik konsumen berdasarkan pengaruh cuaca sebagai pertimbangan pembuatan kontrak antara pengecer dan produsen listrik di kawasan Australia Timur.

Sedangkan Ullah [13] melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengembangkan model sistem produksi listrik di Kanada serta mensimulasikannya. Berdasarkan penelitian ini, variabel signifikan yang mempengaruhi produksi listrik meliputi tingkat kebutuhan, nilai investasi, produksi listrik, biaya produksi listrik, pemberian harga listrik, sensitivitas lingkungan, dan investasi pada riset dan teknologi.

Aslani, Helo, & Naaranoja [14] telah melakukan penelitian tentang peran kebijakan energi terbarukan dalam menekan ketergantungan akan energi fosil di India. Dalam penelitian ini, diimplementasikan tiga buah skenario yaitu menggunakan parameter kebijakan dan penggunaan jenis energi terbarukan.

2. PEMBAHASAN

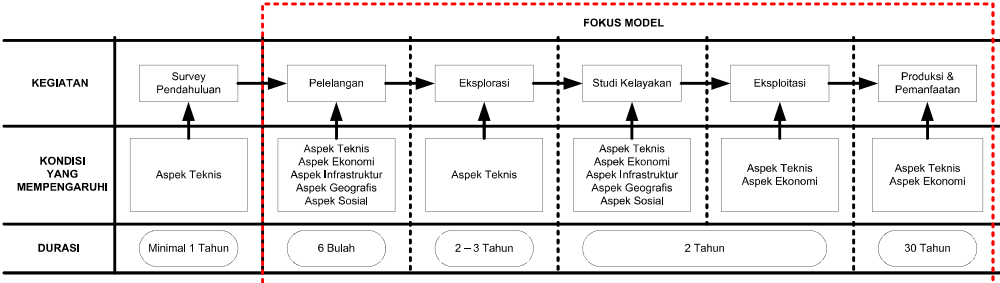
Penelitian dilakukan sesuai dengan kerangka kerja Sistem Dinamik. Dimulai dari bagaimana pemahaman dari sistem *real* yang sedang berjalan berdasarkan masalah dan tujuan penelitian. Kemudian menentukan variabel apa yang signifikan dalam mempengaruhi kinerja sistem. Setelah diketahui seluruh variabel signifikan maka dikembangkan diagram konseptual sistem berupa diagram *causal-loop* dan diagram *stock and flow*. Pada langkah kuantitatif diberikan ekuasi pada diagram *stock and flow* untuk dilakukan proses simulasi. Selanjutnya hasil dari simulasi divalidasi untuk mengetahui apakah model telah merepresentasikan dari sistem yang sebenarnya. Apabila belum valid maka proses kembali ke pemahaman sistem, namun apabila sudah valid maka hasil simulasi bisa dilakukan analisis dan dikembangkan skenario untuk mendapatkan kinerja model yang lebih baik [15][20].

2.1. Pemahaman Sistem

Model yang akan disimulasikan berfokus pada kesuksesan pemanfaatan potensi energi panas bumi sehingga terjadi peningkatan perolehan

nilai kapasitas terpasang dan produksi listrik energi panas bumi. Kesuksesan proyek usaha panas bumi memiliki tahapan-tahapan agar potensi energi panas bumi bisa dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik. Seperti yang dijelaskan pada Gambar 1, pada wilayah berpotensi energi panas bumi dilakukan survey pendahuluan terlebih dahulu untuk diketahui

seberapa besar nilai potensi terduga. Survey tersebut dilakukan oleh pemerintah atau bekerjasama dengan pihak swasta [1][7]. Setelah selesai survey pendahuluan maka wilayah tersebut ditetapkan sebagai wilayah kerja panas bumi (WKP) oleh pemerintah untuk kemudian dilelang kepada paara pengusaha panas bumi.



Gambar 1. Tahapan Usaha Energi Panas Bumi

Pengusaha yang memenangkan lelang menjadi pemegang izin usaha pertambangan (IUP) dan pemegang IUP berhak untuk melakukan pengusahaan atas wilayah tersebut mulai dari kegiatan eksplorasi, studi kelayakan, eksplorasi, dan yang terakhir adalah produksi dan pemanfaatan [1][7]. Pada setiap tahapan terdapat beragam aspek yang mempengaruhi keputusan pengusahaan energi panas bumi tersebut serta memiliki durasi waktu normal dalam menyelesaikan setiap tahapan [1][3][7]. Penelitian ini mencoba untuk memodelkan bagaimana tahapan-tahapan proyek energi panas bumi tersebut bisa direpresentasikan dan disimulasikan dimana fokus model berawal dari tahap pelelangan, eksplorasi, studi kelayakan, eksploitasi, dan yang terakhir adalah produksi dan pemanfaatan. Pada model yang akan dikembangkan, WKP berperan menjadi objek utama yang dimodelkan

sebagai sumber nilai potensi energi panas bumi. Model WKP dibagi menjadi tiga kondisi yaitu model WKP yang telah beroperasi PLTP-nya, kedua model WKP yang sedang proses jalan, dan yang terakhir adalah model WKP baru dimana masih diajukan oleh pemerintah untuk dilelang ke pengusaha. Karena terdapat tahapan yang dipengaruhi oleh aspek infrastruktur, geografis, dan aspek sosial maka model WKP juga dimodelkan dengan dikelompokkan berdasarkan lima wilayah. Kelima wilayah tersebut meliputi WKP yang berada di Sumatra, Jawa-Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, dan Maluku. Diharapkan dengan pengelompokan model WKP ke dalam lima wilayah tersebut maka model semakin memiliki karakteristik yang berbeda sesuai dengan kondisi kelima wilayah tersebut sehingga menambah efek representatif dari model berdasarkan keadaan sistem aslinya.

SUMATRA	8 WKP	10 WKP	3 WKP
JAWA BALI	9 WKP	11 WKP	8 WKP
NUSA TENGGARA	3 WKP	2 WKP	2 WKP
SULAWESI	3 WKP	1 WKP	1 WKP
MALUKU	1 WKP	1 WKP	1 WKP
	BARU TAHAP : - PELELANGAN - EKSPLORASI - STUDI KELAYAKAN - EKSPLOITASI - PRODUKSI	SEDANG JALAN TAHAP : - STUDI KELAYAKAN - EKSPLOITASI - PRODUKSI	SUDAH BEROPERASI TAHAP : - EKSPLOITASI - PRODUKSI

Gambar 2. Model Kondisi WKP secara Umum

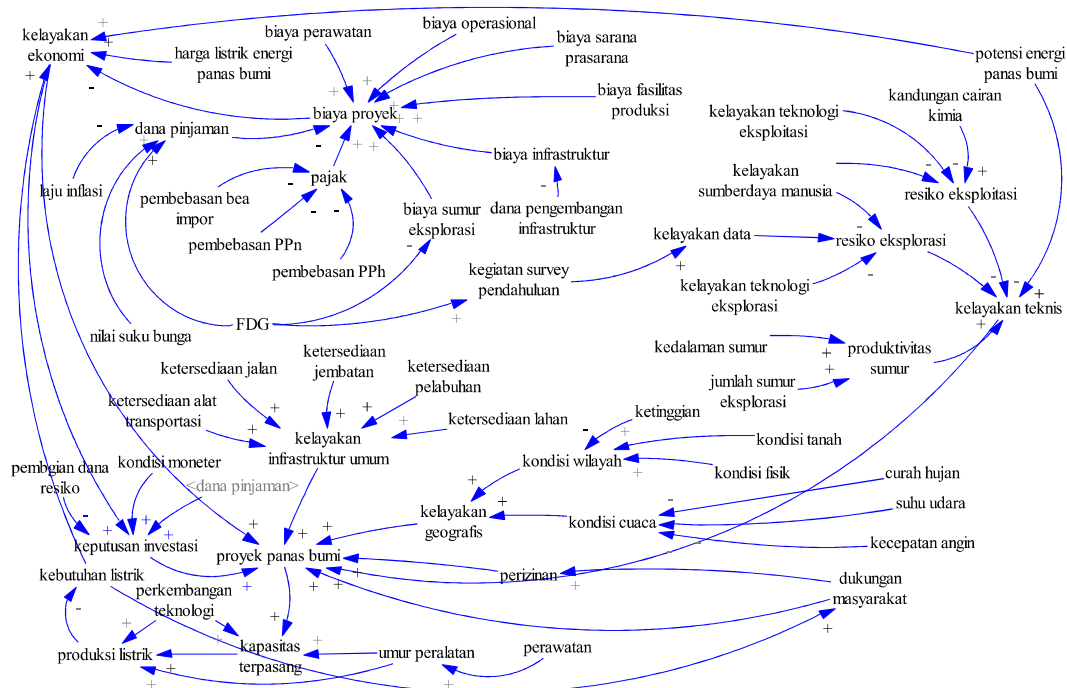
Dengan model WKP yang dibagi ke dalam tiga kondisi dan dikelompokkan kedalam lima wilayah maka model WKP memiliki dua dimensi yang mempengaruhi yaitu dimensi kondisi dan dimensi wilayah seperti yang dikonsepkan seperti pada Gambar 2. Model WKP yang sudah beroperasi memodelkan hanya tahap eksploitasi dan produksi saja. Sedangkan model WKP yang sedang jalan memodelkan tahap studi kelayakan, eksploitasi, dan produksi. Dan model WKP baru memodelkan mulai tahap pelelangan sampai dengan tahap produksi.

2.1 Diagram *Causal-Loop*

Sesuai dengan pemahaman sistem, keberhasilan proyek panas bumi dipengaruhi lima aspek yaitu kelayakan teknis, kelayakan ekonomi, kelayakan infrastruktur, kelayakan geografis, dan dukungan masyarakat sebagai aspek sosial dimana kelima aspek tersebut berpengaruh pada setiap tahap pengembangan proyek panas bumi seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Kemampuan teknis, rencana teknis, dan aktivitas teknis dalam proyek panas bumi mempengaruhi keberhasilan proyek panas bumi

[1]. Sedangkan situasi ekonomi menjadi perhatian penting untuk menciptakan kondisi kondusif bagi pengembangan proyek panas bumi [2]. Infrastruktur yang memadai mampu meringankan beban pengembangan proyek dimana 10% biaya dari keseluruhan proyek adalah masalah infrastruktur [8]. Begitu pula aspek geografis, menjadi faktor penentu kemudahan pengembangan proyek panas bumi [21]. Dukungan dari masyarakat juga penting agar izin proyek panas bumi bisa berjalan tanpa adanya penolakan [7].

Untuk menjaga kinerja pada proyek panas bumi yang sudah berdiri maka perawatan pada alat penting untuk diperhatikan[1]. Perkembangan teknologi juga mendukung untuk meningkatkannya pasokan listrik karena efisiensi yang semakin meningkat [13]. Kebutuhan listrik memiliki hubungan erat dengan produksi listrik seperti hubungan *supply and demand* [14] dimana berdampak pada dukungan masyarakat. Setelah semua terpenuhi hal yang terakhir adalah adanya dana investasi yang konsisten mendukung dan menjamin terselenggaranya usaha panas bumi sampai akhir [2][1].



Gambar 3. Diagram Causal Loop Pemanfaatan Potensi Energi Panas Bumi

Keberhasilan proyek panas bumi ditandai dengan diperolehnya kapasitas terpasang energi panas bumi. Berdasarkan diagram *causal loop* sistem secara keseluruhan terdapat sebuah *balancing loop* antara proyek panas bumi, kapasitas terpasang, produksi listrik, dukungan masyarakat, dan kembali lagi ke kesuksesan proyek panas bumi. Semakin produksi listrik

meningkat maka akan mengurangi kebutuhan listrik. Fasilitas Dana Geotermal (FDG) tidak hanya sebagai fasilitas dana pinjaman dari pemerintah tetapi juga bisa digunakan untuk subsidi aktivitas survey pendahuluan dan pengeboran sumur landai [7][8]. Pemerintah juga mengembangkan dana pengembangan infrastruktur umum untuk provok panas bumi

termasuk untuk menyiapkan fasilitas penyiapan proyek panas bumi sampai pelelangan [8]. Dukungan masyarakat berpengaruh terhadap perizinan pemerintah daerah, sehingga apabila masyarakat menolak maka izin pemerintah daerah tidak akan turun sampai adanya kesepakatan bersama [8].

2.2 Diagram Stock and Flow

Diagram *stock and flow* utama pada penelitian adalah model WKP yang telah beroperasi, model WKP yang sedang berjalan, dan model WKP baru

2.2.1 Model WKP telah Beroperasi

Model WKP yang telah beroperasi memodelkan tahap eksploitasi dan produksi dimana telah diperoleh kapasitas terpasang sebagai representasi dari berhasilnya PLTP didirikan. WKP yang telah beroperasi dimodelkan seperti pada Gambar 4. Nilai kapasitas terpasang diperoleh seperti pada persamaan 1

$$KT = \text{Potensi} \times \text{PerKT} \quad (1)$$

Dimana:

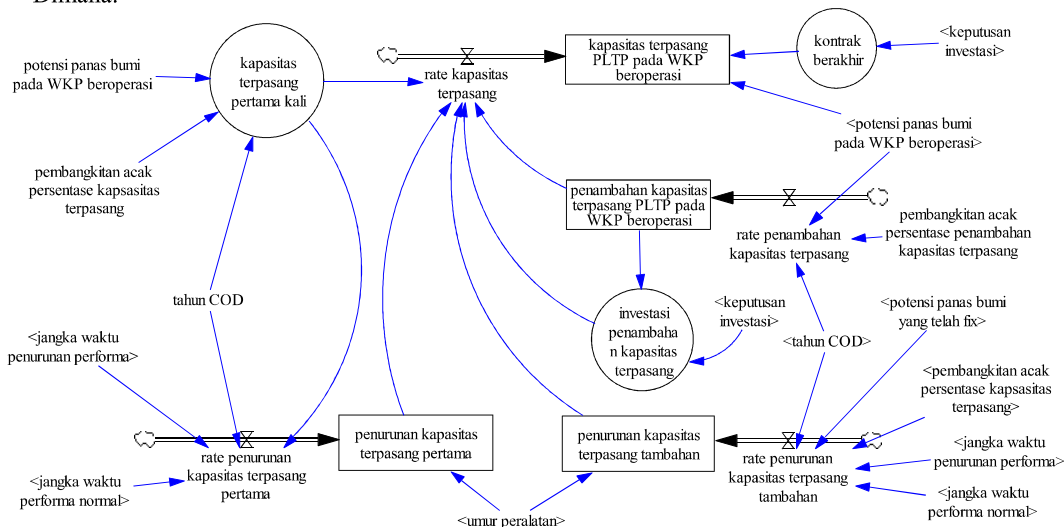


Diagram 4. Diagram Stock and Flow Model WKP telah Beroperasi

Kapasitas terpasang PLTP keseluruhan di setiap tahunnya disimpan dalam level “kapasitas terpasang PLTP pada WKP beroperasi” seperti pada Gambar 4 dimana “rate kapasitas terpasang” berasal dari penjumlahan “kapasitas terpasang pertama kali” dengan “penambahan kapasitas terpasang PLTP pada WKP beroperasi” seperti pada persamaan 2. Konstanta “tahun COD” merupakan tahun *comercial on date* (COD) dimana PLTP mulai beroperasi.

$$KTK = KT + \text{PenKT} \quad (2)$$

KT = kapasitas terpasang pertama (MW)
Potensi = potensi panas bumi (MWe)
PerKT = persentase kapasitas terpasang (%)

Nilai potensi panas bumi berasal dari konstanta “potensi panas bumi pada WKP beroperasi”. Sedangkan nilai persentase dari kapasitas terpasang diperoleh dari auxiliary “pembangkitan acak persentase kapasitas terpasang”. Pada penelitian ini seluruh auxiliary pembangkitan acak distribusi normal menggunakan fungsi RANDOM NORMAL. Nilai level “penambahan kapasitas terpasang PLTP pada WKP beroperasi” menggunakan persamaan 1, bedanya persentase diperoleh dari auxiliary “pembangkitan acak persentase penambahan kapasitas terpasang”. Apabila di sistem kenyataan penambahan kapasitas terpasang dilakukan sekali dalam beberapa tahun maka pada model penambahan kapasitas terpasang ditambahkan di setiap tahunnya. Jadi apabila pada sistem kenyataannya penambahan kapasitas terpasang selama 10 tahun ditambah 100 MW maka pada model di setiap tahunnya bertambah 10 MW.

Dimana:

KTK = kapasitas terpasang PLTP keseluruhan (MW)
KT = kapasitas terpasang pertama (MW)
PenKT = penambahan kapasitas terpasang (MW)

Karena izin produksi diberikan selama 30 tahun maka secara otomatis model WKP tidak akan memiliki nilai kapasitas terpasang lagi setelah 30 tahun dimana batas produksi diatur dalam variabel “kontrak berakhir”. Variabel “keputusan investasi” merupakan threshold untuk memodelkan apakah dilakukan reinvestasi pada izin produksi yang telah

berakhir atau tidak. Sedangkan level “penurunan kapasitas terpasang pertama” dan level “penurunan kapasitas terpasang tambahan” digunakan untuk mengurangi nilai kapasitas terpasang dikarenakan peralatan PLTP mengalami degradasi kemampuan dikarenakan umur peralatan”.

2.2.2 Model WKP yang sedang Berjalan

Gambar 5 merupakan model WKP dengan kondisi sedang berjalan dimana memodelkan tahap studi kelayakan, eksploitasi, dan produksi. Sehingga untuk memperoleh kapasitas terpasang sama dengan model WKP yang telah beroperasi seperti Gambar 4 menggunakan persamaan 1 dan persamaan 2 namun model WKP yang sedang jalan terlebih dahulu mengalami model tahap studi kelayakan.

Untuk memperoleh hasil keputusan di model maka digunakan nilai binary 0 atau 1. Apabila nilai 0 maka keputusan berarti “tidak”, sedangkan nilai 1 maka keputusan berarti “iya”. Untuk memperoleh nilai 0 atau 1 maka digunakan fungsi RANDOM BINOMIAL. Kemungkinan hasil keputusan bernilai 0 atau 1 ditentukan oleh parameter probabilitas. Auxiliary “keputusan studi kelayakan” seperti

pada Gambar 5, nilai probabilitas ditentukan dari persentase auxiliary “probabilitas studi kelayakan”. Semakin nilai persentase probabilitas mendekati 100% maka kemungkinan keputusan untuk bernilai 1 akan semakin besar.

$$ProbSK = \left(KS \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) + \left(KI \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) + \left(KE \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) + \left(KG \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) + \left(KTEpt \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) \quad (3)$$

Dimana:

ProbSK = probabilitas studi kelayakan (%)

KS = dukungan masyarakat (%)

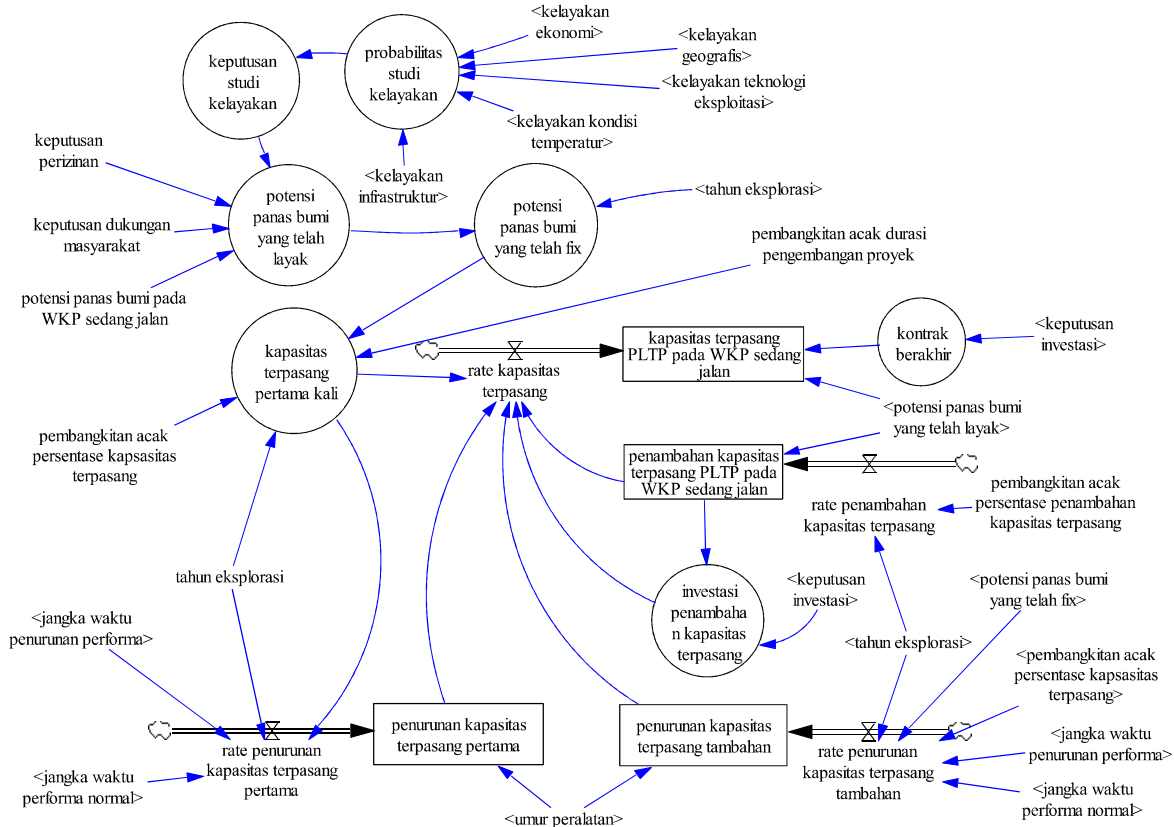
KI = kelayakan infrastruktur (%)

KE = kelayakan ekonomi (%)

KG = kelayakan geografis (%)

KTEpt = kelayakan teknologi eksploitasi (%)

“probabilitas studi kelayakan” dipengaruhi oleh variabel “kelayakan ekonomi”, “kelayakan geografis”, “kelayakan teknologi eksploitasi”, “kelayakan kondisi temperatur”, dan “kelayakan infrastruktur”. Khusus untuk variabel “kelayakan geografis”, “kelayakan infrastruktur”, dan “keputusan dukungan masyarakat” memiliki nilai yang dinamis sesuai dengan dimana wilayah model WKP dikelompokkan.



Gambar 5. Diagram Stock and Flow Model WKP yang sedang Berjalan

2.2.3 Model WKP Baru

Gambar 6 merupakan diagram *stock and flow* WKP kondisi baru. Model WKP baru memodelkan tahap pelelangan, eksplorasi, studi kelayakan, eksploitasi, dan produksi. Untuk memperoleh kapasitas terpasang dari model WKP kondisi baru sama dengan model WKP yang telah dijelaskan sebelumnya menggunakan persamaan 1 dan persamaan 2. WKP baru juga mengalami tahap studi kelayakan seperti WKP yang sedang jalan. Bedanya pada WKP baru, sebelum potensi energi panas bumi mengalami tahap studi kelayakan, potensi energi panas bumi mengalami model tahap pelelangan dan tahap eksplorasi.

Sesuai dengan Gambar 6, berawal dari nilai “potensi energi panas bumi pada WKP baru” dimana menuju ke keputusan keberhasilan pelelangan yang ditentukan oleh auxiliary “keputusan hasil lelang” dengan menggunakan fungsi RANDOM BINOMIAL dimana nilai probabilitas berasal dari auxiliary “probabilitas keputusan lelang” sesuai persamaan 4.

$$ProbKL = \left(KD \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) + \left(KSDM \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) + \left(KE \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) + \left(KI \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) + \left(KG \times \left(\frac{20}{100} \right) \right) \quad (4)$$

Dimana:

ProbKL = probabilitas keberhasilan lelang
KD = kelayakan data
KSDM = kelayakan sumberdaya manusia
KE = kelayakan ekonomi
KI = kelayakan infrastruktur
KG = kelayakan geografis

Apabila nilai auxiliary “keputusan hasil pelelangan” bernilai 1 maka potensi panas bumi berhasil masuk ke tahap selanjutnya yaitu tahap eksplorasi. Pada tahap eksplorasi, keberhasilan eksplorasi tergantung auxiliary “kesuksesan penemuan panas bumi”. Auxiliary tersebut menggunakan fungsi RANDOM BINOMIAL dimana nilai probabilitas berasal dari auxiliary “probabilitas kesuksesan penemuan”. Auxiliarynya memiliki persamaan seperti pada persamaan 5.

$$ProbKP = \left(KTEpr \times \left(\frac{50}{100} \right) \right) + \left(\left(\frac{KSum - minKSum}{maksKSum - minKSum} \right) \times \left(\frac{25}{100} \right) \right) + \left(\left(\frac{JSum - minJSum}{maksJSum - minJSum} \right) \times \left(\frac{25}{100} \right) \right) \quad (5)$$

Dimana:

ProbKP = probabilitas keberhasilan penemuan (%)
KTEpr = kelayakan teknologi eksplorasi (%)
KSum = kedalaman sumur (m)
minKSum = minimal kedalaman sumur (m)
maksKSum = maksimal kedalaman sumur (m)

JSum = jumlah sumur (unit)
minJSum = minimal jumlah sumur (unit)
maksJSum = maksimal jumlah sumur (unit)

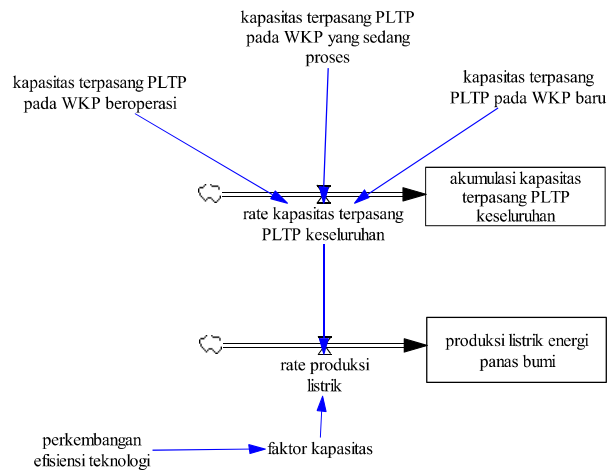
2.2.4 Model Kapasitas Terpasang dan Produksi Listrik

Selanjutnya nilai kapasitas terpasang dari setiap model WKP baik model WKP yang telah beroperasi, sedang berjalan, dan baru dijumlahkan menjadi satu dan disimpan pada level “akumulasi kapasitas terpasang PLTP keseluruhan” seperti pada Gambar 7. Penjumlahan seluruh kapasitas terpasang dari setiap model WKP dilakukan pada “rate kapasitas terpasang PLTP keseluruhan”

$$AkKT = \sum_{i=1}^n KTKops \text{ ke } n + \sum_{i=1}^n KTKpros \text{ ke } n + \sum_{i=1}^n KTKbaru \text{ ke } n \quad (6)$$

Dimana:

AkKT = akumulasi kapasitas terpasang PLTP keseluruhan (MW)
KTKops = kapasitas terpasang keseluruhan pada WKP beroperasi (MW)
KTKpros = kapasitas terpasang keseluruhan pada WKP yang sedang proses (MW)
KTKbaru = kapasitas terpasang keseluruhan pada WKP baru (MW)
n = jumlah WKP



Gambar 7. Diagram Stock and Flow Kapasitas Terpasang dan Produksi Listrik

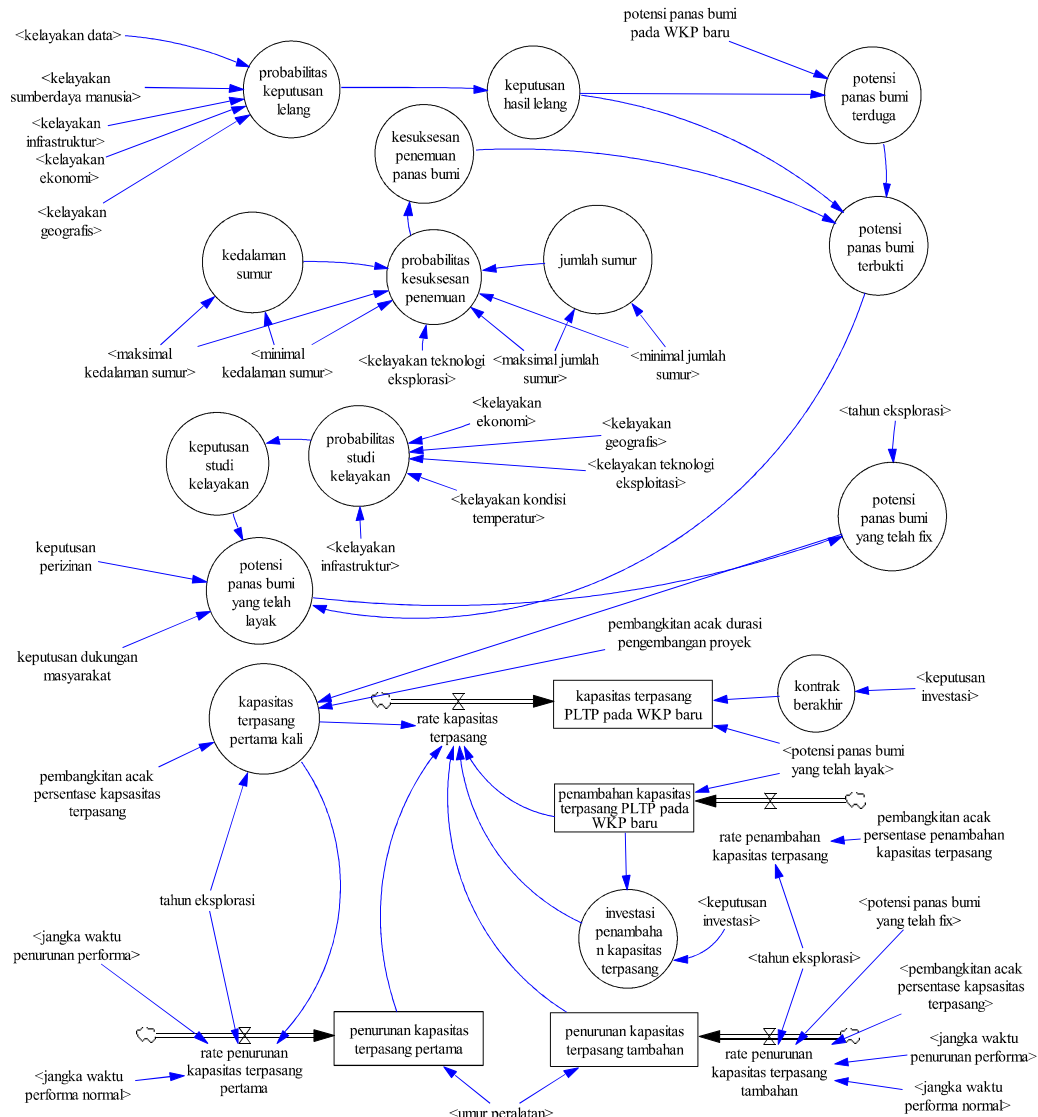
Kemudian dari kapasitas terpasang energi panas bumi di tiap tahunnya dicari produksi listrik energi panas bumi. Diperlukan nilai faktor kapasitas untuk memperoleh produksi nilai listrik dimana nilainya dibangkitkan secara acak dengan diistribusi normal berdasarkan data.

$$PL = ((AkKT * 8760) * (FK)) / 1000 \quad (7)$$

Dimana:

PL = produksi listrik panas bumi (GWh)
AkKT = akumulasi kapasitas terpasang (MW)
FK = faktor kapasitas (%)

Faktor kapasitas dipengaruhi oleh “efisiensi perkembangan teknologi” sehingga semakin nilai efisiensi bertambah maka semakin besar faktor kapasitas terpasang.

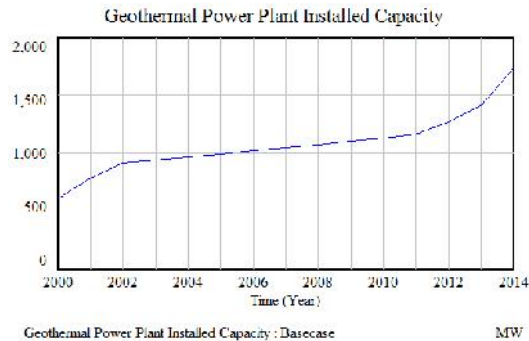


Gambar 6. Diagram Stock and Flow Model WKP Baru

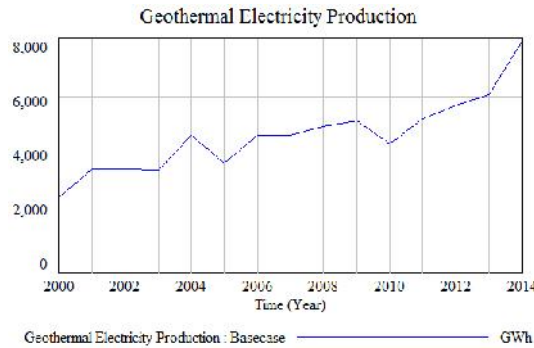
2.3 Simulasi Model Basecase

Pada penelitian ini model *basecase* disimulasikan sesuai dengan ketersediaan data historis tahunan antara tahun 2000 sampai dengan tahun 2014 sehingga simulasi *basecase* dilakukan pada INITIAL TIME = 2000, FINAL TIME = 2014, dan TIME STEP = 1. Jumlah WKP yang disimulasikan ada 64 model WKP yang terdiri dari 14 model WKP yang telah beroperasi, 24 model WKP yang sedang proses jalan, dan 25 model WKP baru dimana belum dilelang. Hasil simulasi untuk nilai kapasitas

terpasang ada pada Gambar 8 sedangkan untuk produksi listrik ada pada Gambar 9.



Gambar 8. Hasil Simulasi Kapasitas Terpasang



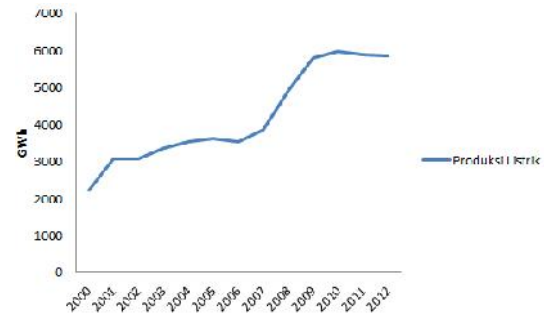
Gambar 9. Hasil Simulasi Produksi Listrik

2.4 Uji Validasi

Uji validasi pada model dilakukan dengan membandingkan antara data historis (asli) dari tahun 2000 sampai dengan 2014 dengan data hasil simulasi model *basecase*. Gambar 10 merupakan grafik data historis kapasitas terpasang energi panas bumi dan Gambar 11 merupakan grafik data historis produksi listrik energi panas bumi dimana nilainya diolah sebelumnya dari laporan Statistik PLN [23], Handbook of Energy and Economic Statistics Indonesia [24], dan berbagai jurnal referensi [19][20].



Gambar 10. Data Historis Kapasitas Terpasang Energi Panas Bumi



Gambar 10. Data Historis Produksi Listrik Energi Panas Bumi

Validasi dilakukan menggunakan dua cara yaitu *mean comparison* dan *variance comparison*. Menurut Barlas [16] model valid apabila *mean comparison* ($E1 < 5\%$) dan *variance comparison* ($E2 < 30\%$). Hasil validasi kapasitas dan produksi listrik energi panas bumi dipaparkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Hasil Validasi Kapasitas Terpasang

Kapasitas Terpasang	Data Asli	Data Simulasi
Mean	1057.873	1077.833
Standar Deviasi	323.1551	253.1009
$E1 < 5\%$	$0.018868 \times 100 = 1.8\%$	
$E2 < 30\%$	$0.216782 \times 100 = 21\%$	

Tabel 2. Hasil Validasi Produksi Listrik

Produksi Listrik	Data Asli	Data Simulasi
Mean	4192.385	4344
Standar Deviasi	1253.696	863.0022
$E1 < 5\%$	$0.036146 \times 100 = 3.6\%$	
$E2 < 30\%$	$0.285648 \times 100 = 28\%$	

Untuk menambah keabsahan model maka dilakukan uji validasi terhadap parameter lain berupa jumlah WKP yang telah sukses beroperasi seperti pada Tabel 3 dan durasi pengembangan proyek seperti pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil Validasi Jumlah Model WKP yang Sukses Beroperasi

Jumlah WKP Berhasil	Data Asli	Data Simulasi
Mean	2.3	2.4
Standar Deviasi	2.002498	2.2
$E1 < 5\%$	$0.043478 \times 100 = 4.3\%$	
$E2 < 30\%$	$0.098628 \times 100 = 9.8\%$	

Tabel 4. Hasil Validasi Durasi Pengembangan Proyek

Durasi Pengembangan Proyek	Data Asli	Data Simulasi
Mean	10.14286	10.35807143
Standar Deviasi	3.398679	3.063973924
E1 < 5%	0.02121831 x 100 = 2.1 %	
E2 < 30%	0.098480989 x 100 = 9.8 %	

Dari hasil uji validasi terbukti bahwa model telah cukup merepresentasikan dari sistem kenyataannya dimana nilai hasil *mean comparison* dan *variance comparoson* antara data hasil simulasi dengan data historis kurang dari 5% untuk *mean comparison* dan kurang dari 30% untuk *variance comparison*.

2.5 Pengembangan Skenario

Pada penelitian ini dikembangkan lima skenario baik skenario perubahan parameter maupun skenario perubahan struktur. Terdapat lima skenario yang dilakukan, yaitu:

a. Skenario *Do Nothing*

Skenario dikembangkan dengan mensimulasikan model *basecase* tanpa adanya

perubahan parameter ataupun struktur dari sistem.

b. Skenario Meningkatkan Kesuksesan Pelelangan

Skenario dikembangkan dengan meningkatkan nilai parameter yang mempengaruhi keputusan pelelangan sehingga kemungkinan kesuksesan pelelangan semakin besar.

c. Skenario Meningkatkan Kesuksesan Investasi

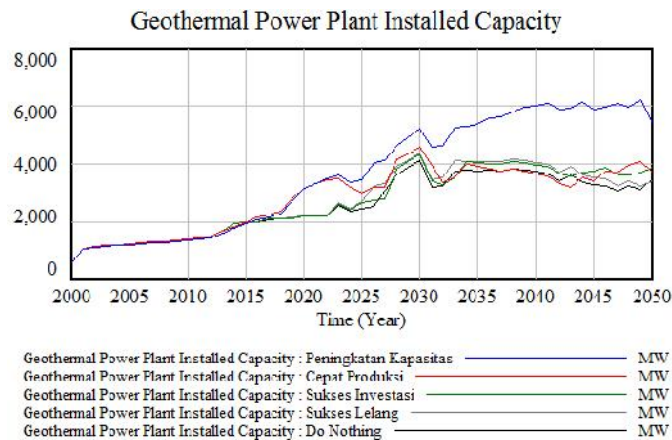
Skenario dikembangkan dengan meningkatkan nilai variabel untuk meningkatkan nilai *threshold* keputusan investasi.

d. Skenario Mempercepat Tahap Produksi

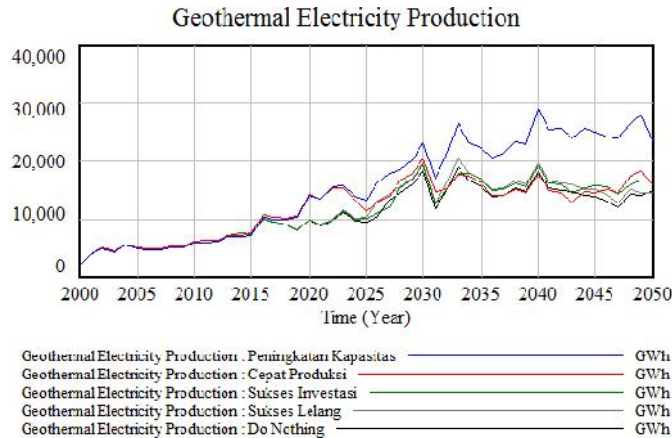
Skenario dikembangkan untuk memangkas durasi pengembangan proyek sehingga tahap produksi yang ditandai dengan perolehan kapasitas terpasang semakin cepat.

e. Skenario Meningkatkan Kapasitas Terpasang

Skenario dikembangkan untuk meningkatkan kapasitas terpasang dengan cara menaikkan harga jual listrik panas bumi dimana bertujuan untuk meningkatkan keuntungan PLTP dalam melakukan ekspansi penambahan kapasitas terpasang.



Gambar 12. Perbandingan Kapasitas Terpasang Hasil Skenario



Gambar 13. Perbandingan Produksi Listrik Hasil Pengembangan Skenario

Implementasi skenario dilakukan dengan melakukan proyeksi sampai tahun 2050 dimana mengganti FINAL TIME = 2050. Hasil setiap skenario ditampilkan kesemuanya seperti pada Gambar 12 untuk hasil simulasi skenario kapasitas terpasang energi panas bumi dan Gambar 13 untuk hasil simulasi skenario produksi listrik energi panas bumi.

2.6 Analisis

Hasil skenario *do nothing* banyak model WKP yang tumbang saat dilakukan simulasi pelelangan. Pada 24 model WKP kondisi baru terdapat 11 model yang mengalami kegagalan. Tingkat kemungkinan keberhasilan pelelangan yang kecil dikarenakan dengan rendahnya kelayakan sumberdaya manusia serta kondisi dari ketersediaan tenaga profesional dimana masih jauh dari mencukupi. Saat ini hanya tersedia 700 tenaga profesional di 300 titik panas bumi [25]. Padahal satu wilayah panas bumi paling tidak dibutuhkan 15 tenaga profesional [17]. Meskipun kelayakan ekonomi cukup bagus dengan *threshold* > 60% Pemerintah tetap perlu meningkatkan berbagai jaminan ekonomi dan insentif agar keputusan investasi investor tetap berlanjut. Sedangkan untuk kelayakan infrastruktur khusus di wilayah Sumatra dan Jawa Bali sudah bagus dan memadai, wilayah Sulawesi cukup memadai. Yang begitu rendah kelayakan infrastrukturnya adalah wilayah Nusa Tenggara dan Maluku dimana *threshold kelayakan infrastruktur* di bawah 60%.

Implementasi skenario dengan mensukseskan pelelangan, membuat tahap pelelangan untuk semua model WKP baru berhasil dilalui. Namun demikian nilai kapasitas terpasang di tahun 2025 masih belum mencapai target Percepatan Pembangunan Pembangkit Listrik 10.000 MW Tahap II dimana kapasitas terpasang hanya mencapai 2.696 MW MW dengan produksi listrik sebesar 10.340 GWh. Skenario meningkatkan kesuksesan investasi tidak membuat kinerja lebih tinggi dibandingkan implementasi skenario meningkatkan kesuksesan pelelangan dimana di tahun 2025 hanya mencapai 2.659 MW dengan produksi listrik 10.199 GWh. Namun demikian kesuksesan investasi membuat nilai kapasitas terpasang bisa dipertahankan di tahun 2045 ke atas dibandingkan dengan skenario lainnya karena keberhasilan investasi menjaga operasional produksi tetap berjalan. Meskipun durasi pembangunan dipercepat menggunakan kebijakan baru berupa Perizinan Terpadu Satu Pintu (PTSP) [26] sekalipun, hal tersebut dapat dikatakan sudah terlambat sebagai strategi mencapai target Percepatan Pembangunan Pemabangkit Listrik 10.000 MW

Tahap II yang berada pada tahun 2025. Namun demikian PTSP tetap membantu untuk mempercepat kesuksesan proyek panas bumi dan proyek-proyek lain dalam hal pembangunan jangka panjang dimana hasil simulasi skenario kapasitas terpasang energi panas bumi mencapai 2.982 MW MW dengan produksi listrik 11.438 GWh GWh.

Hasil skenario peningkatan kapasitas terpasang dengan meningkatkan harga jual listrik panas bumi per KWh membuat peningkatan perolehan kapasitas terpasang dan produksi listrik panas bumi terbesar. Peningkatan harga jual listrik panas bumi disesuaikan dengan Patokan Tertinggi Permen ESDM no 17 Tahun 2014. Hasilnya di tahun 2025 kapasitas terpasang panas bumi mencapai 3.458 MW dengan produksi listrik sebesar 13.263 GWh.

Untuk memperjelas hasil kinerja dari setiap skenario maka hasil simulasi produksi listrik dari setiap skenario dibandingkan dengan proyeksi pemanfaatan tenaga listrik milik BPPT [27] dimana grafik nilai proyeksi ditampilkan pada Gambar 14. BAU merupakan skenario *best case* sedangkan High merupakan skenario *worst case*.



Gambar 13. Proyeksi Pemanfaatan Tenaga Listrik BPPT

Nilai persentase diambil nilai perbandingan antara produksi listrik hasil simulasi dengan kebutuhan pemanfaatan tenaga listrik sebagai bentuk kemampuan dalam memenuhi kebutuhan tenaga listrik.

$$PKin = \frac{PLSim}{KPLis} \times 100 \quad (7)$$

Dimana:

PKin = Persentase kinerja skenario (%)

PLSim = Produksi listrik hasil simulasi skenario (TWh)

KPLis = Kebutuhan pemanfaatan tenaga listrik hasil BPPT (TWh)

Hasilnya ditampilkan seperti pada tabel 5 dimana dilakukan perbandingan pada tahun 2025 sebagai tahun target Percepatan Pembangunan Pembangkit Listrik 10.000 MW Tahap II.

Tabel 5. Persentase Kinerja Produksi Listrik Hasil Simulasi dari Setiap Skenario Tahun 2025

Skenario	2025	
	BAU	High
<i>Do Nothing</i>	2.01%	1.73%
Meningkatkan Kesuksesan Lelang	2.19%	1.88%
Meningkatkan Kesuksesan Investasi	2.16%	1.86%
Mempercepat Tahap Produksi	2.42%	2.08%
Meningkatkan Kapasitas Terpasang	2.81%	2.42%

Tabel 6 merupakan rangkuman hasil keseluruhan skenario yang dikembangkan dimana dijelaskan capaian kapasitas terpasang di tahun 2025, persentase target yang bisa dicapai, produksi listrik di tahun 2025, dan persentase ketersediaan produksi listrik dalam memenuhi kebutuhan pemanfaatan tenaga listrik tahun 2025 hasil dari BPPT.

Tabel 6. Kinerja Hasil Simulasi dari Setiap Skenario di tahun 2025

Skenario	Kapasitas Terpasang 2025	Persentase Target	Produksi Listrik 2025	Persentase Tersedia 2025
<i>Do Nothing</i>	2.469 MW	24.6%	9.471 GWh	1.73% - 2.01%
Meningkatkan kesuksesan lelang	2.596 MW	26.9%	10.340 GWh	1.88% - 2.19%
Meningkatkan kesuksesan investasi	2.509 MW	26.3%	10.199 GWh	1.86% - 2.16%
Mempercepat durasi pengembangan	2.982 MW	29.8%	11.438 GWh	2.08% - 2.42%
Meningkatkan kapasitas terpasang	3.428 MW	34.3%	13.263 GWh	2.42% - 2.81%

Skenario meningkatkan kapasitas terpasang dengan meningkatkan harga jual listrik panas bumi menjadi skenario terbaik dalam meningkatkan kinerja kesuksesan pemanfaatan potensi energi panas bumi dengan. Variabel harga jual listrik panas bumi menjadi parameter signifikan dalam mempengaruhi kesuksesan ekspansi penambahan kapasitas terpasang. Dengan meningkatkan harga jual listrik maka akan meningkatkan keuntungan dari perusahaan panas bumi sehingga bisa memaksimalkan pengembangan panas bumi selanjutnya. Meskipun belum ada skenario yang bisa mencapai target pemerintah, setidaknya telah jelas langkah apa yang cocok diambil pemerintah untuk meningkatkan kesuksesan pengembangan dan pemanfaatan potensi energi panas bumi sebagai alternatif energi listrik terbarukan.

3. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan ini maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Penelitian ini telah berhasil mengembangkan model pemanfaatan potensi energi panas bumi untuk alternatif

pembangkit energi listrik terbarukan dimana hasil simulasi telah sesuai dengan syarat uji validasi menggunakan *mean comparison* dan *variance comparison*.

2. Telah dikembangkan lima model skenario meliputi satu skenario *do nothing* untuk mengetahui proyeksi *basecase*, dan empat skenario peningkatan kinerja meliputi skenario meningkatkan kesuksesan pelelangan, meningkatkan kesuksesan investasi, mempercepat tahap produksi, dan meningkatkan kapasitas terpasang untuk meningkatkan kinerja sistem pemanfaatan potensi energi panas bumi sebagai alternatif tenaga listrik terbarukan.
3. Ketiga skenario meliputi meningkatkan kesuksesan lelang, mempercepat produksi, dan meningkatkan kapasitas terpasang dengan meningkatkan harga jual listrik panas bumi berhasil meningkatkan kinerja sistem, terbukti dengan meningkatnya perolehan kapasitas terpasang dan produksi listrik meskipun target Percepatan Pembangunan Pembangkit Listrik 10.000 MW Tahap II di tahun 2025 tidak tercapai.
4. Skenario meningkatkan kesuksesan investasi mampu mempertahankan perolehan kapasitas terpasang panas bumi pada tahun-tahun berikutnya.
5. Skenario meningkatkan kapasitas terpasang dengan cara menaikkan harga jual listrik panas bumi merupakan skenario terbaik. Terbukti proyeksi perolehan kapasitas terpasang di tahun 2025 menjadi yang terbesar dibandingkan skenario lainnya mencapai 2.982 MW dimana sebesar 34.5% dari target 10.000 MW. Skenario meningkatkan kapasitas terpasang mampu memperoleh produksi listrik mencapai 11.438 GWh di tahun 2025 setara dengan 2.81% - 2.42% kebutuhan.

Penelitian yang dilakukan masih memiliki keterbatasan penggunaan data. WKP yang dimodelkan dan disimulasikan pada penelitian ini hanya 63 wilayah prospek dimana sebenarnya masih ada 256 – 300 titik wilayah prospek. Sehingga pada penelitian kedepannya bisa dimodelkan dan disimulasikan keseluruhan jumlah wilayah prospek. Penelitian juga bisa dilanjutkan dengan mengembangkan skenario untuk bagaimana cara agar bisa mendapatkan kapasitas terpasang sebesar 10.000 MW secepatnya

4. DAFTAR RUJUKAN

- [1] Saptadji, N. (2013). *Sekilas tentang Panas Bumi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- [2] Setiawan, S. (2012, Juni). Energi Panas Bumi dalam Kerangka MP3EI: Analisis terhadap Prospek, Kendala, dan Dukungan Kebijakan. *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan*, XX(1), 1-27.
- [3] Sanyal, S., & Koenig, J. (1995). Resource Risk and Its Mitigation for The Financing of Geothermal Project. *Proceedings of The World Geothermal Congress*, (pp. 2911-2915).
- [4] Tumiran. (2014, Maret 19). *Rencana Peraturan Pemerintah Kebijakan Energi Nasional*. Yogyakarta: Dewan Energi Nasional.
- [5] Pusdatin ESDM. (2014). *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia*. 2014.
- [6] Richardson, G. P. (2013). System Dynamics. (S. I. Gass, & M. C. Fu, Eds.) *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, 1519-1522.
- [7] Timotius, C. (2008). Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia. *Jurnal Elec-trans*, 7(13), 7-15.
- [8] Jusron, D., & Ircam, S. R. (2012). Fasilitas Fiskal untuk Mendukung Percepatan Pembangunan Infrastruktur. *Buletin Info Risiko Fiskal (IRF) Edisi IV*.
- [9] Harisman, R. (2013, Juni 20). *Insentif Fiskal dan Instrument Pembiayaan untuk Pengembangan Energi Terbarukan dan Pengembangan Listrik Perdesaan*. Jakarta, Jakarta, Indonesia.
- [10] GeothermEx, I. (2010). *An Assessment of Geothermal Resource Risks in Indonesia*. California: World Bank.
- [11] Jalal, T. S., & Bodger, P. (2010). *The Development of a System Dynamics Model to Evaluate Electricity Generation Expansion in New Zealand*. *Universities Power Engineering Conference* (pp. 1-6). Christchurch: IEEE.
- [12] Rasjidin, R., Kumar, A., Alam, F., & Abosuliman, S. (2012). *A System Dynamics Conceptual Model on Retail Electricity Supply and Demand System to Minimize Retailer's Cost in Eastern Australia*. *Envolving Energy-IEF International Energy Congress* (pp. 330-337). Elsevier.
- [13] Ullah, H. Q. (2013). *Understanding the Dynamics of Electricity Generation Capacity in Canada A System Dynamics Approach*. Energy, 285-294.
- [14] Aslani, A., Helo, P., & Naaranoja, M. (2014). *Role of Renewable Energy Policies in Energy Dependency in Finland: System Dynamics Approach*. *Applied Energy*, 758-765.
- [15] Vaudreuil, Guerin, Arnold, & Timms. (2011). *System Dynamics Computer Simulation Modeling to Forecast the Energy Demands for the Montachest Region Under a Variety of Stimulation and Scenarios*.
- [16] Barlas, Y. (1996). *Formal aspects of model validity and validation in system dynamics*. *System Dynamics Review*, 12, 183-210.
- [17] Wasliah, E. S. (2015, march 19). *galamedianews.com*. Retrieved november 10, 2015, from *galamedianews.com*.
- [18] Tumiran. (2014, Maret 19). *Rencana Peraturan Pemerintah Kebijakan Energi Nasional*. Yogyakarta: Dewan Energi Nasional.
- [19] S. Darma, S. Harsoprayitno, B. Setiawan, Hadyanto, R. Sukhyar, A. W. Sudibjo, N. Genefianto, J. Stimac. (2010). *Geothermal Energy Update: Geothermal Energy Development and Utilization in Indonesia*. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*.
- [20] Direktur Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi. (2011). *Perkembangan Status Wilayah Kerja Pertambangan Panas Bumi*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral.
- [21] Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. New York: Jeffrey J. Shelstad.
- [22] *energytoday.com*. (2014, April 25). *Distribusi PLN Terkendala Penyebaran Pemukiman dan Kondisi Geografi*. Retrieved March 10, 2015, from *energytoday.com*.
- [23] PLN. (2013). *Statistik PLN 2013*. Jakarta: Sekretariat Perusahaan PLN.
- [24] Pusdatin ESDM. (2014). *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2014*.
- [25] Inspirasi Bangsa. (2014, May 6). *inspirasi bangsa.com*. Retrieved November 10, 2015, from *inspirasi bangsa.com*.
- [26] Wijayanto, N. (2015, Januari 27). *Proses Perizinan Dipangkas*. Retrieved November 10, 2015, from *ekbis.sindonews.com*.
- [27] BPPT. (2014). *Outlook Energi Indonesia 2014*. Jakarta: PTPSE.