

# Studi Perencanaan Penambahan Kapasitas Pembangkit di Pulau Sumbawa Menggunakan Metode *Mixed Integer Linear Programming* Tahun 2022-2030

Goldian Roganda Gurning, Rony Seto Wibowo, dan Ni Ketut Aryani  
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: rony@ee.its.ac.id

**Abstrak**—Pertambahan penduduk, pertumbuhan ekonomi yang positif, dan *growth rate* rasio elektrifikasi PLN merupakan penyebab utama meningkatnya kebutuhan listrik. Di Pulau Sumbawa, penduduk bertambah sebesar 1,596% di tahun 2022. Begitu pula tren pertumbuhan ekonomi yang relatif positif pasca pandemi serta target elektrifikasi 100% yang terus dikejar oleh PLN UIW NTB. Konsekuensinya, beban puncak di Sistem Sumbawa-Bima diproyeksi mengalami laju pertumbuhan sebesar 9,37% tiap tahunnya hingga akhir waktu studi menjadi 256 MW. Pada *initial year* penelitian, terkalkulasi total kapasitas terpasang dari pembangkit eksisting sebesar 167,36 MW dengan daya mampu netto hanya 148,11 MW. Adanya *gap* antara kenaikan beban puncak dan kapasitas pembangkit eksisting di tahun 2022 harus dipenuhi dengan studi *Generation Expansion Planning* (GEP). GEP digagas dengan objektif untuk memperoleh skenario integrasi unit pembangkit kandidat paling optimal ke dalam grid, ditinjau dari faktor ekonomi dan keandalan. Pemodelan matematika dari kondisi *real* Sistem Sumbawa-Bima berhasil dilakukan mengacu pada bentuk umum metode *Mixed Integer Linear Programming* (MILP). Simulasi MATLAB menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh *feasible* dan konvergen. Fungsi objektif skenario MILP-1 memberi nilai total *fixed cost* sebesar \$107.140.986,48-, lebih murah sekitar \$7.122.431,38-, dari skenario perencanaan milik PLN. *Reserve Margin* (RM)  $\geq 40\%$  di tiap tahunnya juga berhasil diperoleh, dengan penambahan yang relatif lebih *balanced* dibandingkan skenario PLN. Hal ini menunjukkan bahwa studi GEP di Sistem Sumbawa-Bima berhasil dimodelkan secara linear menggunakan metode MILP dengan pemodelan sistem telah memenuhi seluruh *constraint* linear yang ditetapkan.

**Kata Kunci**—*Constraint Linear*, *Generation Expansion Planning* (GEP), *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), Pemodelan Sistem, *Reserve Margin* (RM).

## I. PENDAHULUAN

ENERGI listrik memiliki peran yang sangat vital bagi kehidupan manusia saat ini. Pertambahan penduduk, pertumbuhan ekonomi yang positif, dan *growth rate* rasio elektrifikasi PLN merupakan penyebab utama meningkatnya kebutuhan listrik [1], tak terkecuali di Pulau Sumbawa. Rerata akumulasi pertumbuhan penduduk Pulau Sumbawa tahun 2022 sebesar 1,596%—*naik 0,112% dari tahun 2021*—menjadi 1,581 juta penduduk dan diproyeksikan akan terus bertambah hingga 2030. Laju pertumbuhan PDRB ADHK Pulau Sumbawa di tahun 2021 sebesar 1,418%—*turun 1,166% dari tahun 2020, tetapi naik sebesar 0,054% dibanding tahun 2017*—menjadi Rp535,58 triliun dan diproyeksikan akan mengalami tren pertumbuhan positif hingga 2030 [2]. Adapun rasio elektrifikasi Provinsi NTB tahun 2022 sebesar 99,98%—*naik 0,79% dari tahun 2021*—dan akan terus ditarget mencapai 100% oleh PLN UIW NTB,

dengan perhatian utama terhadap desa-desa di daerah *isolated* [3]. Sebagai konsekuensi, kebutuhan listrik di Pulau Sumbawa akan ikut meningkat; pada *Generation Expansion Planning* (GEP) secara spesifik direpresentasikan dalam beban puncak. Pada Sistem Sumbawa-Bima, beban puncak netto diproyeksikan mengalami laju pertumbuhan sebesar 9,37% hingga akhir waktu studi, dimana pada tahun 2022 terkalkulasi 125 MW hingga pada tahun 2030 nilainya menjadi 256 MW. Di sisi lain, total kapasitas terpasang pembangkit eksisting sebesar 167,36 MW dengan daya mampu netto hanya mencapai 148,11 MW. Adanya *gap* antara kenaikan beban puncak dengan kapasitas pembangkit eksisting di tahun 2022 harus dipenuhi. Dengan analisis sederhana, PLN setidaknya harus menambah kapasitas dari pembangkit baru setidaknya sekitar 21,27 MW setiap tahunnya. Dari kondisi aktual ini juga diperoleh nilai *reserve margin* (RM) = 33,888% pada tahun 2022, dan nilainya akan terus berkurang hingga pada tahun 2030 tercatat nilai RM = -34,625% [4]. Dengan nilai  $RM \leq 40\%$  (ideal), maka sistem terancam tidak dapat memenuhi kebutuhan listrik pada periode tertentu, yang mana hal tersebut sangat tidak diinginkan baik dari pihak penyedia tenaga listrik maupun konsumen listrik.

Perencanaan ekspansi pembangkit (GEP) merupakan salah satu masalah paling kompleks yang berkaitan dengan sistem pembangkit tenaga listrik (PTL) [5]. GEP digagas dengan objektif memperoleh skenario integrasi unit pembangkit kandidat yang paling optimal ke dalam jaringan listrik utama yang terinterkoneksi (grid), dengan parameter teknis berupa variasi teknologi, tipe, kapasitas, kemampuan produksi energi listrik, *lifetime*, *capacity factor* (CF), dll. Ada total 13 pembangkit kandidat dengan akumulasi kapasitas terpasang sebesar 223,38 MW dan total energi produksi mencapai 846.146,6208 MWh. Ada total 6 unit pembangkit terbarukan dengan akumulasi kapasitas sebesar 43,38 MW atau 19,419%. Pembangkit terbarukannya akan memanfaatkan potensi energi setempat seperti tenaga air, biomassa, panas bumi, dan matahari. Untuk memastikan objektif tercapai, unit pembangkit kandidat harus dipilih dan direncanakan secara cermat. Dengan demikian, model optimasi yang mempertimbangkan parameter finansial dan teknis telah dirumuskan ke dalam skenario GEP tahun 2022-2030.

Berdasarkan kondisi aktual Sistem Sumbawa-Bima yang telah dipaparkan, diperoleh sebuah gagasan bahwa perlu dilakukan studi GEP di Pulau Sumbawa. Studi GEP ini diekspetasikan harus memenuhi faktor-faktor dasar GEP seperti keandalan (*reliability*) dan kelayakan ekonomi. Metode yang digunakan adalah *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), dengan perumusan fungsi objektif



Gambar 2. Beban puncak terhadap DMP pembangkit eksisting sistem.

(*objective function*) mempertimbangkan batasan-batasan (*constraints*) dalam bentuk persamaan (*equality*) berupa relasi unit pembangkit kandidat terbangun terhadap produksi energinya dan pertidaksamaan (*inequality*) yang terdiri dari 6 pernyataan berikut: rating kapasitas terpasang per unit pembangkit kandidat, energi produksi per unit pembangkit kandidat, kebutuhan penambahan kapasitas per tahun, akumulasi *energy demand* per tahun, status unit pembangkit kandidat, dan *lifetime*. Pemodelan matematis dikerjakan secara manual memanfaatkan *software* Microsoft Excel serta proses simulasi menggunakan *software* MATLAB. Hasil yang diperoleh akan dianalisis dari segi teknis dan finansial; analisis dan kesimpulannya dapat dijadikan sebagai perbandingan terhadap studi GEP sebelumnya sekaligus referensi untuk studi GEP di masa mendatang. Beban puncak terhadap DMP pembangkit eksisting sistem diberikan pada Gambar 1.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

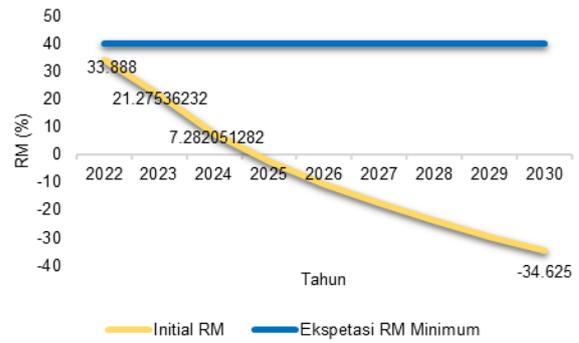
### A. Generation Expansion Planning (GEP)

Perencanaan merupakan aspek yang krusial dalam sistem tenaga listrik (STL). Perencanaan dilakukan untuk memastikan ketersediaan, keandalan, dan keekonomisan proses di dalam STL, baik di sistem pembangkit, sistem transmisi, maupun sistem distribusi. Perencanaan jangka pendek pada sistem distribusi dikenal dengan *Unit Commitment* (UC). UC merupakan penjadwalan operasi dari unit-unit pembangkit listrik untuk mendapatkan biaya operasi yang paling minimum tanpa mengabaikan batasan-batasan penting sesuai dengan kondisi *real* sistem [6]. Sementara itu, perencanaan jangka panjang pada sistem pembangkit dikenal dengan *Generation Expansion Planning* (GEP).

GEP merupakan serangkaian proses penentuan skenario integrasi pembangkit baru untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat. GEP di-*propose* untuk menjamin ketersediaan pasokan listrik yang andal dan ekonomis dengan memperhitungkan parameter teknis dan finansial dari unit pembangkit kandidat. Hal ini dapat membantu penyedia tenaga listrik untuk mengambil keputusan terkait pengalokasian sumber dayanya dalam rangka memenuhi kebutuhan energi listrik mendatang. Proses optimasi diperlukan untuk mencapai keputusan yang valid, mengacu pada suatu metode matematika yang relevan [7].

### B. Reserve Margin (RM)

Keandalan sistem berkaitan dengan kemampuan STL untuk menyalurkan energi listrik ke seluruh konsumen secara



Gambar 1. *Initial reserve margin* sistem.

kontinu. Pada sistem pembangkit, keandalan dapat ditinjau dari kriteria deterministik—*tidak memperhitungkan stokastik alami sistem pembangkit*—seperti *reserve margin*. RM merupakan cadangan daya pembangkit terhadap beban puncak, dinyatakan dalam %. PLN menetapkan nilai RM optimal yaitu 35% untuk Sistem Jawa-Bali dan 40% untuk sistem lainnya, termasuk Sistem Sumbawa-Bima. *Initial reverse margin* sistem diberikan pada Gambar 2.

### C. Parameter Teknis Pembangkit

Parameter yang mengacu pada spesifikasi teknis dari suatu pembangkit listrik. Pada model optimasi GEP ini, ada beberapa parameter teknis yang diimplementasikan, yang ditunjukkan pada (1) hingga (5). Daya mampu merujuk pada daya pembangkitan bersih baik pada *single unit* maupun *multiple units* suatu *plant*. Daya mampu diperoleh dengan mengurangi daya terpasang dengan pemakaian sendiri (1). Energi bruto merupakan total produksi oleh generator dari suatu *plant* (3). Energi netto merupakan jumlah energi produksi suatu STL, dari internal dan eksternal grid, hingga seluruh pembangkit sewa dikurangi dengan pemakaian sendiri (4).

$$P_{MP} = P_{TPS} - PS \tag{1}$$

$$CF = \frac{E_{bruto}}{P_{TPS} \times SH} \times 100\% \tag{2}$$

$$E_{bruto} = P_{TPS} \times CF \times SH \tag{3}$$

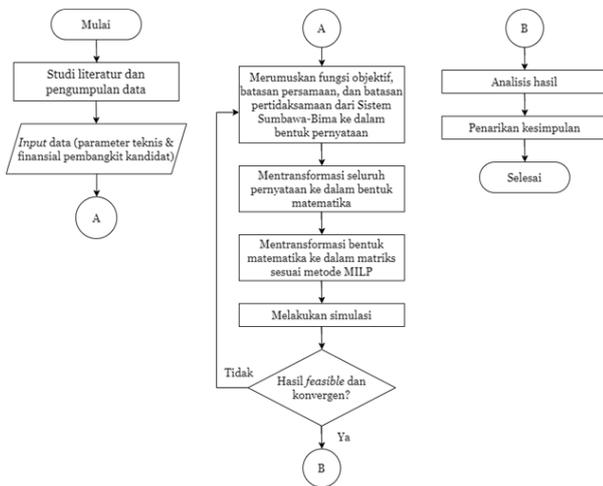
$$E_{netto} = E_{bruto} - PS \tag{4}$$

$$PS = 2,5\% \times E_{bruto} \tag{5}$$

dengan  $P_{MP}$  adalah daya mampu (MW),  $P_{TPS}$  adalah daya terpasang (MW),  $PS$  adalah pemakaian sendiri (MW/MWh),  $CF$  adalah faktor kapasitas (%),  $E_{bruto}$  adalah energi bruto (MWh),  $E_{netto}$  adalah energi netto (MWh),  $SH$  adalah *service hours* (h).

### D. Parameter Finansial Pembangkit

Dalam konteks proyek pembangkit listrik, pembiayaan dapat dibagi menjadi 3 mengacu pada waktu dan sifat biaya sebagai berikut: (1) Biaya investasi (*capital cost*), yang merujuk pada biaya awal yang harus dikeluarkan oleh penyedia tenaga listrik untuk membangun suatu unit pembangkit hingga pembangkit tersebut dapat dioperasikan. Biaya ini meliputi biaya eksplorasi, field development, konstruksi, dll yang relevan. (2) Biaya tetap (*fixed cost*), yang merujuk pada biaya yang bersifat tetap, memproduksi energi



Gambar 3. Flowchart penelitian.

atau tidaknya suatu unit pembangkit tidak memengaruhi besar biaya ini. Biaya tetap harus rutin dibayar untuk menjamin kelangsungan operasional pembangkit, baik dari segi manajemen SDM maupun manajemen alat melalui pemeliharaan. Fixed cost meliputi biaya administrasi umum pekerja, biaya regulasi unit pembangkit, biaya preventive maintenance, dll yang relevan. (3) Biaya tidak tetap (*variable cost*), yang merujuk pada biaya yang berkaitan dengan jumlah energi listrik yang dibangkitkan. Biaya ini sangat mempengaruhi proses operasional dan penjadwalan pembangkit. Variable cost meliputi biaya pemrosesan limbah, fuel & delivery cost, inhouse power cost, dll yang relevan.

### III. METODOLOGI DAN PEMODELAN

#### A. Alur Penelitian

Dalam upaya menyelesaikan suatu permasalahan optimasi, diperlukan alur kerja. Alur yang disusun telah disesuaikan dengan mengacu pada metode MILP pada Gambar 3, yang terbagi menjadi 5 *chapter* besar sebagai berikut: (1) pendefinisian masalah, (2) pengumpulan data, (3) pemodelan system, (4) proses simulasi, (5) implementasi hasil akhir.

#### B. Mixed Integer Linear Programming (MILP)

MILP merupakan metode yang mampu mendefinisikan variabel keputusannya baik dalam bentuk linear maupun integer. Fungsi objektif dan seluruh batasannya bersifat linear, dengan pertama-tama memodelkan kondisi aktual suatu permasalahan—*dalam studi ini yakni Sistem Sumbawa-Bima*—ke dalam pernyataan matematis lalu ditransformasi ke bentuk akhir berupa matriks. Solusi optimal diperoleh jika semua batasan yang ditetapkan telah dipenuhi (*satisfied*). MILP dapat diaplikasikan dalam studi GEP untuk mendapat kombinasi unit pembangkit kandidat dengan total *fixed cost* dan total *variable cost* paling murah. Pada MATLAB, metode ini akan menghasilkan nilai variabel ( $x$ ) dalam bentuk matriks vektor 1 kolom, dengan fungsi objektif optimum telah terakumulasi dalam bentuk skalar. Pemodelan matematisnya mengacu pada bentuk umum berikut, antara lain fungsi objektif yang diberikan pada Persamaan (6).

$$F(x) = \min_x f^T x \quad (6)$$

Batasan persamaan linier diberikan pada Persamaan (7).

$$A_{eq}x = b_{eq} \quad (7)$$

Batasan pertidaksamaan linier diberikan pada Persamaan (8).

$$Ax \leq b \quad (8)$$

Batasan penentuan variabel diberikan pada Persamaan (9).

$$l_b \leq x \leq u_b \quad (9)$$

Batasan integer diberikan pada Persamaan (10).

$$x(int) \in \{\dots, -1, 0, 1, \dots\} \quad (10)$$

#### C. Pendefinisian Variabel

Pada studi ini terdapat 13 unit pembangkit kandidat dengan waktu studi ditetapkan selama 9 tahun sehingga tiap variabel keputusan dari tugas akhir ini berjumlah  $13 \times 9 = 117$  variabel. Diputuskan variabel keputusan pertama dan kedua berturut-turut yakni rating kapasitas dan energi produksi dari tiap unit pembangkit kandidat. Lalu, diperlukan variabel integer dari 2 variabel keputusan sebelumnya. Berikut ini dijelaskan mengenai detail pendefinisian. (1)  $x_{1-117}$  merupakan nilai rating kapasitas dari unit pembangkit kandidat; dengan  $x_{1-13}$  merepresentasi nilai kapasitas ke-13 unit pembangkit di tahun ke-1, tahun ke-2, dst. (2)  $x_{118-234}$  merupakan *integer variable*/status terbangun dari unit pembangkit kandidat; dengan  $x_{118-130}$  merepresentasi status ke-13 unit pembangkit di tahun ke-1, ke-2, dst. (3)  $x_{235-351}$  merupakan nilai energi produksi dari unit pembangkit kandidat; dengan  $x_{235-248}$  merepresentasi nilai energi produksi ke-13 unit pembangkit di tahun ke-1, ke-2, dst. (4)  $x_{352-468}$  merupakan *Integer variable*/status produksi energi dari unit pembangkit kandidat; dengan  $x_{352-364}$  merepresentasi status ke-13 unit pembangkit di tahun ke-1, ke-2, dst.

#### D. Penyusunan Fungsi Objektif

“Sepanjang waktu studi, minimumkan total biaya penambahan pembangkit.” Pernyataan ini dapat dirumuskan secara matematis pada (11) [7].

$$\min \sum_y \sum_i [(FC_{total_i}^y \times P_{TPSi}^y) + (VC_{total_i}^y \times E_{netto_i}^y) x_{int_i}^y] = F(P_i^y, x_{int_i}^y) \quad (11)$$

$$FC_{total_i}^y = AP + O\&M \text{ fixed} \quad (12)$$

$$VC_{total_i}^y = Fuel \text{ cost} \times O\&M \text{ variable} \quad (13)$$

$$AP = Investment \text{ cost} \times CRF \quad (14)$$

$$CRF = \frac{k(1+k)^n}{(1+k)^n - 1} \quad (15)$$

dengan  $FC_{total_i}^y$  adalah total *fixed cost* unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$  (\$/MW),  $VC_{total_i}^y$  adalah total *variable cost* unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$  (\$/MWh),  $x_{int_i}^y$  adalah variabel integer unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$ ; bernilai 1 jika unit pembangkit dibangun atau memproduksi energi, bernilai 0 jika sebaliknya,  $F(P_i^y)$  adalah fungsi biaya investasi atau biaya pembangkitan energi unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$ ,  $I$  adalah indeks nomor unit pembangkit kandidat;  $i=1, \dots, 13$ ,  $y$  adalah indeks tahun dalam waktu studi;

$y=1, \dots, 9$ ,  $k$  adalah suku bunga (%),  $n$  adalah *lifetime* pembangkit.

Pemodelan fungsi objektif sederhana dengan 4 unit pembangkit kandidat di tahun ke-1 ditunjukkan pada (17) dengan mengacu pada (6), (11).

$$F(P)^1 = a_1^1 P_1^1 + a_2^1 P_2^1 + a_3^1 P_3^1 + 0_1^1 x_{int(P)_1}^1 + 0_2^1 x_{int(P)_2}^1 + 0_3^1 x_{int(P)_3}^1 + b_1^1 E_1^1 + b_2^1 E_2^1 + b_3^1 E_3^1 + 0_1^1 x_{int(E)_1}^1 + 0_2^1 x_{int(E)_2}^1 + 0_3^1 x_{int(E)_3}^1 \quad (16)$$

$$F(P^1) = [a_1^1 \ a_2^1 \ a_3^1 \ 0 \ 0 \ 0 \ b_1^1 \ b_2^1 \ b_3^1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (17)$$

**E. Pembuatan Matriks Aeq dan Beq**

Pada studi GEP ini ditetapkan 1 persamaan yang dideklarasikan sebagai berikut. “Jika suatu unit pembangkit kandidat dibangun di tahun tertentu, maka unit tersebut juga yang akan memproduksi energi di tahun tersebut dan seterusnya hingga akhir waktu studi.” Pernyataan ini dapat dirumuskan secara matematis pada (18) [8].

$$x_{int(P)_i}^y = x_{int(E)_i}^y \quad (18)$$

dengan  $x_{int(P)_i}^y$  adalah variabel integer dari rating kapasitas unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$ ,  $x_{int(E)_i}^y$  adalah variabel integer dari energi produksi unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$ .

Pemodelan persamaan untuk variabel integer ke-13 unit pembangkit kandidat ditunjukkan pada (22) dengan mengacu pada (7), (17).

$$x_{118 \rightarrow 234} = x_{352 \rightarrow 468} \quad (19)$$

$$x_{118 \rightarrow 234} - x_{352 \rightarrow 468} = 0 \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} x_{118} & 0 & 0 & \dots & -x_{352} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \ddots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & x_{234} & \dots & 0 & 0 & -x_{468} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \ddots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

**F. Pembuatan Matriks A dan B**

Pada studi GEP ini diimplementasikan 6 pertidaksamaan yang dideklarasikan sebagai berikut.

**1) Rating Kapasitas**

“Nilai kapasitas terpasang dari suatu unit pembangkit kandidat terbangun.” Pernyataan ini dapat dirumuskan secara matematis pada (23) [6], [9-10].

$$P_{min_i}^y \times x_{int(P)_i}^y \leq P_{TPS_i}^y \leq P_{max_i}^y \times x_{int(P)_i}^y \quad (23)$$

dengan  $P_{min_i}^y$  adalah rating kapasitas terpasang min. unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$  (MW), dan  $P_{max_i}^y$  adalah rating kapasitas terpasang max. unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$  (MW)

Pemodelan pertidaksamaan untuk unit ke-1 pada tahun ke-1 ditunjukkan pada (29) dengan mengacu pada (8)-(9), (23).

$$\begin{bmatrix} P_{min_1}^1 \times x_{int_1}^1 \\ P_{min_2}^1 \times x_{int_2}^1 \\ P_{min_3}^1 \times x_{int_3}^1 \\ P_{min_4}^1 \times x_{int_4}^1 \\ P_{min_5}^1 \times x_{int_5}^1 \\ P_{min_6}^1 \times x_{int_6}^1 \\ P_{min_7}^1 \times x_{int_7}^1 \\ P_{min_8}^1 \times x_{int_8}^1 \\ P_{min_9}^1 \times x_{int_9}^1 \\ P_{min_{10}}^1 \times x_{int_{10}}^1 \\ P_{min_{11}}^1 \times x_{int_{11}}^1 \\ P_{min_{12}}^1 \times x_{int_{12}}^1 \\ P_{min_{13}}^1 \times x_{int_{13}}^1 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} P_1^1 \\ P_2^1 \\ P_3^1 \\ P_4^1 \\ P_5^1 \\ P_6^1 \\ P_7^1 \\ P_8^1 \\ P_9^1 \\ P_{10}^1 \\ P_{11}^1 \\ P_{12}^1 \\ P_{13}^1 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} P_{max_1}^1 \times x_{int_1}^1 \\ P_{max_2}^1 \times x_{int_2}^1 \\ P_{max_3}^1 \times x_{int_3}^1 \\ P_{max_4}^1 \times x_{int_4}^1 \\ P_{max_5}^1 \times x_{int_5}^1 \\ P_{max_6}^1 \times x_{int_6}^1 \\ P_{max_7}^1 \times x_{int_7}^1 \\ P_{max_8}^1 \times x_{int_8}^1 \\ P_{max_9}^1 \times x_{int_9}^1 \\ P_{max_{10}}^1 \times x_{int_{10}}^1 \\ P_{max_{11}}^1 \times x_{int_{11}}^1 \\ P_{max_{12}}^1 \times x_{int_{12}}^1 \\ P_{max_{13}}^1 \times x_{int_{13}}^1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$P_i^y \min = P_i^y \max \quad (25)$$

$$P_1^1 \leq a \times x_{118}^1 \rightarrow P_1^1 - (a \times x_{118}^1) \leq 0 \quad (26)$$

$$P_1^1 \geq a \times x_{118}^1 \rightarrow -P_1^1 + (a \times x_{118}^1) \leq 0 \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} P_1^1 & 0 & 0 & \dots & -a \times x_{118}^1 & 0 & 0 \\ -P_1^1 & 0 & 0 & \dots & a \times x_{118}^1 & 0 & 0 \\ 0 & P_2^1 & 0 & \dots & 0 & -b \times x_{119}^1 & 0 \\ 0 & -P_2^1 & 0 & \dots & 0 & b \times x_{119}^1 & 0 \\ 0 & 0 & P_3^1 & \dots & 0 & 0 & -c \times x_{120}^1 \\ 0 & 0 & -P_3^1 & \dots & 0 & 0 & c \times x_{120}^1 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & -a & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & \dots & a & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & -b & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & -c \\ 0 & 0 & -1 & \dots & 0 & 0 & c \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

**2) Energi Produksi**

“Kapasitas optimal yang dapat dihasilkan suatu unit pembangkit kandidat selama periode waktu tertentu.” Pernyataan ini dapat dirumuskan secara matematis pada (30) [6], [9-10].

$$E_{min_i}^y \times x_{int(E)_i}^y \leq E_i^y \leq E_{max_i}^y \times x_{int(E)_i}^y \quad (30)$$

$$E_{max_i}^y = E_{bruto_i}^y = P_{TPS_i}^y \times CF_i \times SH_y \quad (31)$$

$$E_{min_i}^y = 50\% \times E_{bruto_i}^y \quad (32)$$

dengan  $E_{min_i}^y$  adalah energi produksi min. unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$  (MWh), dan  $E_{max_i}^y$  adalah energi produksi max. unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$  (MWh)

Pemodelan pertidaksamaan untuk unit ke-1 pada tahun ke-1 ditunjukkan pada (36) dengan mengacu pada (8)-(9), (30).

$$E_{min_1}^1 \leq d \times x_{352}^1 \text{ dan } E_{max_1}^1 \geq d \times x_{352}^1 \quad (33)$$

$$E_{min_1}^1 - (d \times x_{352}^1) \leq 0 \text{ dan } -E_{max_1}^1 + (d \times x_{352}^1) \leq 0 \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} E_{min_1}^1 & 0 & 0 & \dots & -d \times x_{352}^1 & 0 & 0 \\ -E_{max_1}^1 & 0 & 0 & \dots & d \times x_{352}^1 & 0 & 0 \\ 0 & E_{min_2}^1 & 0 & \dots & 0 & -e \times x_{353}^1 & 0 \\ 0 & -E_{max_2}^1 & 0 & \dots & 0 & e \times x_{353}^1 & 0 \\ 0 & 0 & E_{min_3}^1 & \dots & 0 & 0 & -f \times x_{354}^1 \\ 0 & 0 & -E_{max_3}^1 & \dots & 0 & 0 & f \times x_{354}^1 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & -d & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & \dots & d & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & -e & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & e & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & -f \\ 0 & 0 & -1 & \dots & 0 & 0 & f \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

3) *Kebutuhan Penambahan Kapasitas per Tahun*

“Penambahan unit pembangkit kandidat harus mampu memenuhi akumulasi beban puncak dan ekspetasi RM minimum dikurangi total kapasitas terpasang seluruh pembangkit eksisting di tahun terkait.” Pernyataan ini dapat dirumuskan secara matematis pada (37) [1].

$$\sum_y \sum_i P_{TPS}_i^y \geq [(140\% \times P_{peak}_y) - P_{eksisting}_y] \quad (37)$$

dengan  $P_{eksisting}_y$  adalah total kapasitas terpasang pembangkit eksisting pada tahun  $y$  (MW), dan  $P_{peak}_y$  adalah beban puncak pada tahun  $y$  (MW).

Pertidaksamaan ini diimplementasikan pada range variabel keputusan  $x_{1-117}$ . Pemodelan pertidaksamaan untuk ke-13 unit pada tahun ke-1 ditunjukkan pada (43) dengan mengacu pada (8), (37).

$$\begin{aligned} P_1^1 + P_2^1 + P_3^1 + P_4^1 + P_5^1 + P_6^1 + P_7^1 + P_8^1 + P_9^1 + P_{10}^1 + \\ P_{11}^1 + P_{12}^1 + P_{13}^1 \geq [(140\% \times P_{peak}_1) - P_{eksisting}_1] \end{aligned} \quad (38)$$

$$P_1^1 + P_2^1 + P_3^1 + P_4^1 + P_5^1 + P_6^1 + P_7^1 + P_8^1 + P_9^1 + P_{10}^1 + P_{11}^1 + P_{12}^1 + P_{13}^1 \geq P_1(konstanta) \quad (39)$$

$$-P_1^1 - P_2^1 - P_3^1 - P_4^1 - P_5^1 - P_6^1 - P_7^1 - P_8^1 - P_9^1 - P_{10}^1 - P_{11}^1 - P_{12}^1 - P_{13}^1 \leq P_1(konstanta) \quad (40)$$

$$[-P_1^1 - P_2^1 - P_3^1 - P_4^1 - P_5^1 - P_6^1 - P_7^1 - P_8^1 - P_9^1 - P_{10}^1 - P_{11}^1 - P_{12}^1 - P_{13}^1] \leq [P_1(konstanta)] \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} -P_1^1 & -P_2^1 & \dots & -P_n^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P_1^2 & -P_2^2 & \dots & -P_n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -P_1^y & \dots & -P_n^y & -P_1^y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -P_1 \\ -P_2 \\ -P_y \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & \dots & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & \dots & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & \dots & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -P_1 \\ -P_2 \\ -P_y \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (43)$$

4) *Akumulasi Energy Demand*

“Akumulasi energi produksi dari unit pembangkit kandidat yang terbangun harus memenuhi kenaikan kebutuhan energi (*energy demand*) di tahun terkait.” Pernyataan ini dapat dirumuskan secara matematis pada (44) [6], [9-10].

$$\sum_y \sum_i E_i^y \geq E_{demand}_y \quad (44)$$

Alur pemodelannya sama seperti pertidaksamaan ke-3. Hanya saja, pada pertidaksamaan ini diimplementasikan pada *range* variabel keputusan yang berbeda, yaitu  $x_{235-351}$ . Pemodelan pertidaksamaan untuk ke-13 unit pada tahun ke-1 ditampilkan pada (46) dengan mengacu pada (8), (44).

$$\begin{bmatrix} -E_1^1 & -E_2^1 & \dots & -E_n^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -E_1^2 & -E_2^2 & \dots & -E_n^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -E_1^y & -E_2^y & \dots & -E_n^y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} E_{demand}_1 \\ -E_{demand}_2 \\ -E_{demand}_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & \dots & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & \dots & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & \dots & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} E_{demand}_1 \\ -E_{demand}_2 \\ -E_{demand}_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (46)$$

5) *Status Unit Pembangkit*

“Karena masing-masing unit terdistribusi sebesar 1 unit, maka 1 dapat didefinisikan secara matematis bahwa suatu unit pembangkit kandidat dibangun dan memproduksi energi; 0 sebaliknya”. Ini menyatakan status suatu unit pembangkit kandidat, apakah unit pembangkit tersebut dibangun atau tidak; memproduksi energi atau tidak. Pernyataan ini dapat dirumuskan secara matematis pada (47) [6], [9-10].

$$0 \leq x_{int}_i^y \leq 1 \quad (47)$$

Pemodelan pertidaksamaan untuk variabel integer ke-13 unit pembangkit kandidat ditunjukkan pada (51)-(52) dengan mengacu pada (8)-(10), (39).

$$x_{int}_i^y \leq 1 \quad (48)$$

$$0 \leq x_{int}_i^y \rightarrow -x_{int}_i^y \leq 0 \quad (49)$$

$$\begin{bmatrix} x_{int}_i^y \\ -x_{int}_i^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$\begin{bmatrix} x_{118}^1 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{118}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_{119}^1 & 0 & 0 \\ 0 & -x_{119}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{234}^1 \\ 0 & 0 & 0 & -x_{234}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$\begin{bmatrix} x_{352}^1 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{352}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_{353}^1 & 0 & 0 \\ 0 & -x_{353}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{468}^1 \\ 0 & 0 & 0 & -x_{468}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (52)$$

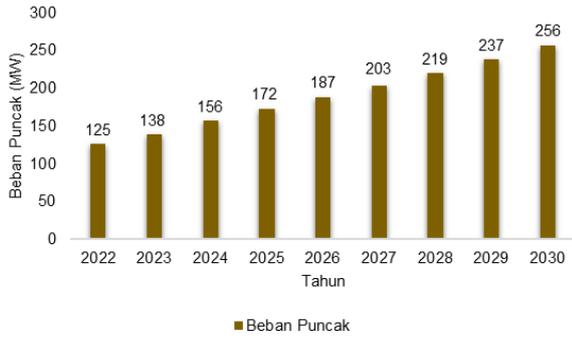
6) *Lifetime*

“Jika suatu unit pembangkit kandidat telah dibangun, maka unit tersebut *setidaknya* harus bertahan hingga akhir waktu studi untuk memproduksi energi.” Pernyataan ini dapat dirumuskan secara matematis pada (53).

$$\sum_y^{LT+y-1} u_y \geq LT(u_{y-1}) \quad (53)$$

dengan  $LT$  adalah *lifetime* pembangkit, dan  $u_y$  adalah variabel integer unit pembangkit kandidat  $i$  pada tahun  $y$ .

*Lifetime* pembangkit diketahui bervariasi, bergantung pada spesifikasi internal dan kondisi operasinya. Misalnya saja, *lifetime* fabrikasi dari PLTU dengan teknologi *Coal SubC* mencapai 30 tahun. Namun, pada optimasi GEP—*didukung pemodelan sistem pada penelitian ini yang dilakukan secara*



Gambar 4. Proyeksi beban puncak sistem.

*manual*—nilai *lifetime* yang diimplementasikan pada pemodelan tidak serta merta mengikuti *lifetime* fabrikasi tersebut. Selain kondisi *real* sistem, pemodelannya harus mengacu juga pada kebutuhan penelitian. Penelitian ini memiliki waktu studi selama 9 tahun sehingga *lifetime* untuk seluruh unit pembangkit kandidat bernilai sama. Dengan demikian, pemodelannya pun berlaku sama untuk semua unit.

Pertidaksamaan ini diimplementasikan pada variabel integer, sebagai contoh pada unit ke-1 pada tahun 1-9 (54). Sesuai (53) dengan mengacu pada logika metode MILP, pada tahun ke-1 nilai  $y$  harus dimulai dari 2 dan  $LT = 8$ . Hal ini dimaksudkan agar batas atas sigma menghasilkan nilai 9. Dalam hal ini, penyesuaian diatur mengacu pada lamanya waktu studi. Hal itu sekaligus mengartikan bahwa jika unit 1 dibangun pada tahun ke-1, unit tersebut *setidaknya* harus bertahan untuk beroperasi hingga tahun ke-9. Begitu pula pada tahun ke-2, nilai  $y$  naik satu menjadi 3 dan  $LT$  turun satu menjadi 7, dst hingga akhir waktu studi. Pemodelan pertidaksamaan untuk unit ke-1 pada tahun 1-9 ditunjukkan pada (59)-(66) dengan mengacu pada (8), (53).

$$x_{118} = unit_1, tahun_1$$

$$x_{131} = unit_1, tahun_2$$

$$x_{144} = unit_1, tahun_3$$

$$x_{157} = unit_1, tahun_4$$

$$x_{170} = unit_1, tahun_5 \tag{54}$$

$$x_{183} = unit_1, tahun_6$$

$$x_{196} = unit_1, tahun_7$$

$$x_{209} = unit_1, tahun_8$$

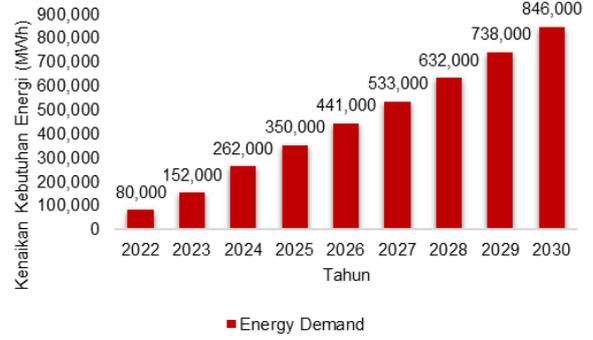
$$x_{222} = unit_1, tahun_9$$

$$\sum_{y=2}^{8+2-1} u_y \geq LT(u_{y-1}) \tag{55}$$

$$\sum_{y=2}^9 u_y \geq 8(u_{y-1}) \tag{56}$$

$$u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + u_6 + u_7 + u_8 + u_9 \geq 8u_1 \tag{57}$$

$$8x_{118} \leq x_{131} + x_{144} + x_{157} + x_{170} + x_{183} + x_{196} + x_{209} + x_{222} \tag{58}$$



Gambar 5. Kenaikan kebutuhan energi sistem.

$$8x_{118} - x_{131} - x_{144} - x_{157} - x_{170} - x_{183} - x_{196} - x_{209} - x_{222} \leq 0 \tag{59}$$

$$7x_{131} - x_{144} - x_{157} - x_{170} - x_{183} - x_{196} - x_{209} - x_{222} \leq 0 \tag{60}$$

$$6x_{144} - x_{157} - x_{170} - x_{183} - x_{196} - x_{209} - x_{222} \leq 0 \tag{61}$$

$$5x_{157} - x_{170} - x_{183} - x_{196} - x_{209} - x_{222} \leq 0 \tag{62}$$

$$4x_{170} - x_{183} - x_{196} - x_{209} - x_{222} \leq 0 \tag{63}$$

$$3x_{183} - x_{196} - x_{209} - x_{222} \leq 0 \tag{64}$$

$$2x_{196} - x_{209} - x_{222} \leq 0 \tag{65}$$

$$x_{209} - x_{222} \leq 0 \tag{66}$$

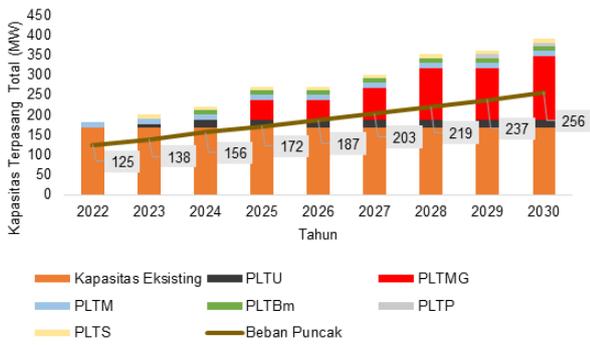
### G. Data Simulasi

Data yang dipakai merupakan data sekunder yang diperoleh dari publikasi otoritas resmi dari Pemerintah [4], [11-12]. Pada penelitian ini diimplementasikan data *input* teknis dan finansial. Data teknis meliputi beban puncak, kenaikan kebutuhan energi, kapasitas terpasang eksisting, rating kapasitas dan energi produksi pembangkit kandidat. Adapun data finansial meliputi CRF, suku bunga, total *fixed cost*, dan total *variable cost*. Proyeksi beban puncak sistem diberikan pada Gambar 4. Kenaikan kebutuhan energi sistem diberikan pada Gambar 5.

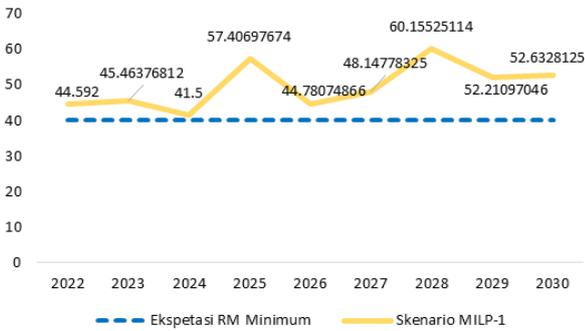
## IV. HASIL DAN ANALISIS

### A. Hasil Optimasi

Hasil optimasi untuk penambahan kapasitas kandidat scenario MILP-1 diberikan pada Gambar 6. Untuk *reserve margin* skenario MILP-1 diberikan pada Gambar 7. Untuk kenaikan kebutuhan energi dibandingkan dengan kemampuan produksi energi diberikan pada Gambar 8. Untuk total *fixed cost* per tahun scenario MILP-1 diberikan pada Gambar 9. Untuk total *variable cost* per tahun scenario MILP-1 diberikan pada Gambar 10. Untuk *reverse margin* scenario RUPTL PLN diberikan pada Gambar 11. Untuk total *fixed cost* per tahun scenario RUPTL PLN diberikan pada Gambar 12. Dan untuk *reverse margin* scenario MILP-2 diberikan pada Gambar 13.



Gambar 8. Penambahan kapasitas kandidat skenario MILP-1.



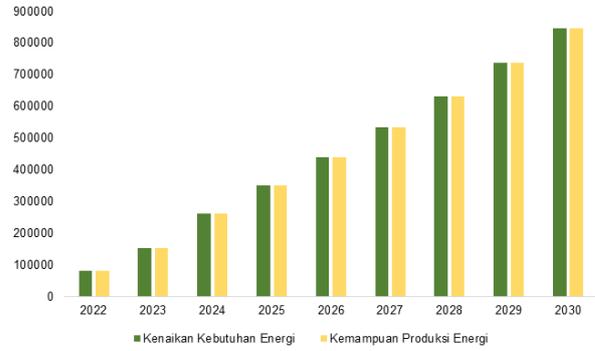
Gambar 9. Reserve margin skenario MILP-1.

**B. Analisis Hasil**

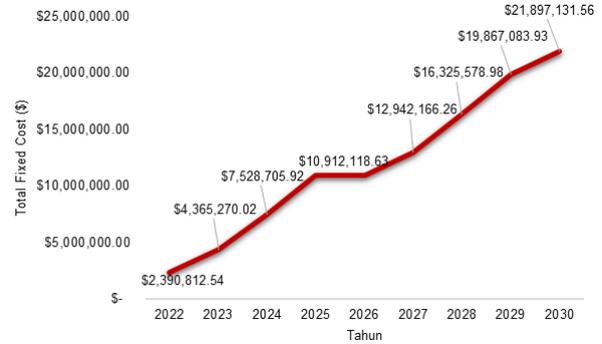
**1) Skenario MILP-1**

Skenario MILP-1 merujuk pada hasil optimasi sesuai pemodelan fungsi linear dengan metode MILP. Matriks yang telah disusun secara manual pada Excel kemudian di-import dan dijalankan pada MATLAB, algoritma MILP pada MATLAB diberikan pada Gambar 14. Hasilnya dianalisis kembali dengan Excel lalu direpresentasikan sebagai berikut. Diperoleh bahwa ke-13 unit pembangkit kandidat dibangun secara bertahap setiap tahunnya. Akumulasi kapasitas sistem per tahunnya telah memenuhi batasan pertidaksamaan ke-3, yaitu kebutuhan penambahan kapasitas per tahun yang direpresentasikan pada Gambar 6. Gambar 7 memperjelas hal tersebut, dimana nilai RM di tiap tahunnya berhasil melampaui ekspektasi minimum dari PLN sebesar 40%. Diperoleh bahwa optimasi berhasil mengeksekusi data input dengan mengacu pada batasan pertidaksamaan yang telah ditetapkan. Batasan mempengaruhi pemilihan penambahan unit pembangkit sehingga RM yang diperoleh relatif *balanced*.

Pembangkit kandidat harus mampu memenuhi kenaikan kebutuhan energi sistem. Gambar 8 menunjukkan bahwa total produksi energi sama besar dengan nilai batas kanan pada batasan pertidaksamaan ke-4. Gambar 9 menunjukkan total *fixed cost* tiap tahun sebagai konsekuensi dibangunnya suatu unit pembangkit kandidat. Biaya ini bersifat konstan dan harus dibayar di setiap tahun. Besarnya biaya mengacu pada penambahan unit pembangkit. Diperoleh akumulasi total *fixed cost* di akhir waktu studi sebesar \$107.140.986,48-. Adapun Gambar 10 menunjukkan total *variable cost* tiap tahun, dimana nilainya bergantung pada energi produksi dari tiap pembangkit. Akumulasi total *variable cost* di tahun 2030 sebesar \$57.115.595,53-. Terakhir, akumulasi dari total *fixed cost* dan total *variable cost* sebesar \$164.256.582,01-.



Gambar 6. Kenaikan kebutuhan energi vs kemampuan produksi energi.



Gambar 7. Total *fixed cost* per tahun skenario MILP-1.

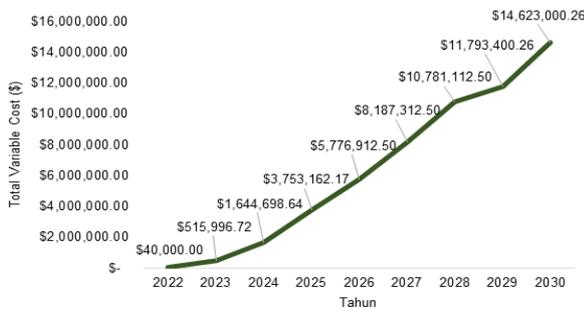
**2) Skenario RUPTL PLN**

Skenario RUPTL merujuk pada hasil optimasi PLN selaku penyedia tenaga listrik. Tidak diketahui pasti metode apa yang dipakai oleh PLN, tetapi diasumsikan bukan metode MILP. Detail hasilnya direpresentasikan sebagai berikut. Diperoleh bahwa ke-13 unit pembangkit kandidat berhasil terbangun secara bertahap hingga akhir waktu studi. Sama halnya dengan skenario MILP-1, akumulasi kapasitas per tahunnya telah memenuhi batasan pertidaksamaan ke-3. Gambar 11 mempertegas hal tersebut, dimana nilai RM tiap tahun telah melampaui 40%. Namun, di tahun 2024-2027 diperoleh nilai RM yang persentasenya meningkat secara signifikan, cukup jauh di atas 40% dengan puncaknya di tahun 2025 sebesar 92,29069767%. Hal ini mengindikasikan bahwa perencanaan akan mengakibatkan *oversupply* di Sistem Sumbawa-Bima. Namun, PLN selaku penyedia tenaga listrik mengizinkan rencana *reserve margin* yang tinggi melebihi kebutuhan yang wajar dengan pertimbangan-pertimbangan yang ada, mengingat Sistem Sumbawa-Bima merupakan salah satu sistem kelistrikan yang berada di luar Sistem Jawa-Bali.

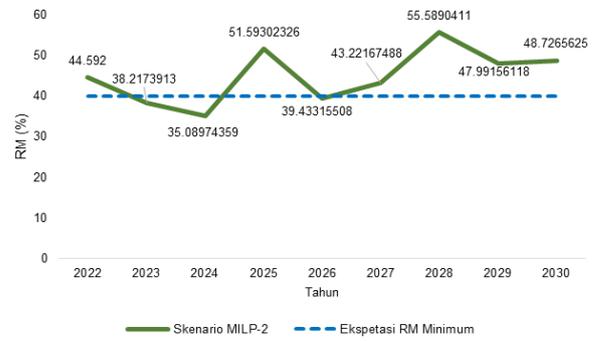
Gambar 12 menunjukkan total *fixed cost* tiap tahun dari skenario RUPTL. Secara khusus pada tahun 2026, tercatat tidak terjadi penambahan unit pembangkit baru karena kombinasi pembangkit kandidat yang dibangun di tahun 2025 masih mampu memenuhi kebutuhan penambahan kapasitas di tahun tersebut. Pada tahun 2030 juga berlaku demikian, dimana penambahan 2 unit PLTU dan 1 unit PLTP di tahun 2029 masih mampu memenuhi kebutuhan penambahan kapasitas di tahun 2030. Akumulasi total *fixed cost* di akhir waktu studi sebesar \$114.263.417,76-.

**3) Skenario RUPTL-2**

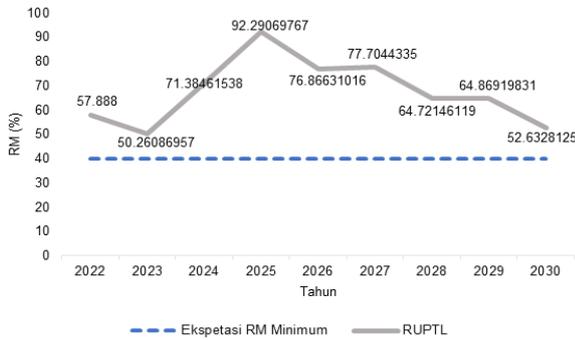
Pada skenario ini, kapasitas 10 MW dari 1 unit PLTS diabaikan sebagai konsekuensi dari ketidakpastian



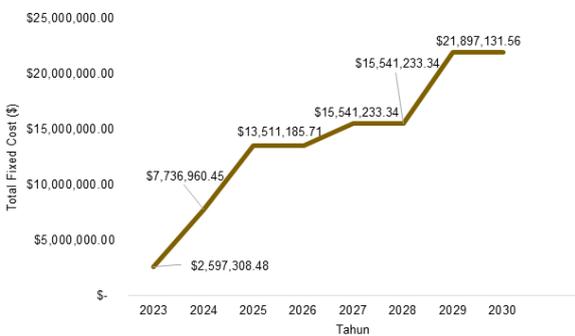
Gambar 10. Total variable cost per tahun skenario MILP-1.



Gambar 13. Reserve margin skenario MILP-2.



Gambar 11. Reserve margin skenario RUPTL PLN.



Gambar 12. Total fixed cost per tahun skenario RUPTL PLN.

(uncertainty) sumber energi primernya. Pada Gambar 13 terlihat di tahun 2023, 2024, dan 2026 nilai  $RM \leq 40\%$ , yang mengindikasikan bahwa pada optimasi MILP-1 terjadi undersupply. Ada baiknya di-propose penambahan kapasitas yang baru, mengingat integrasi PLTS secara on-grid tidak mempertimbangkan adanya baterai sebagai energy storage.

### V. KESIMPULAN

Dari alur penelitian, mulai dari pendefinisian masalah hingga implementasi hasil akhir diperoleh 2 kesimpulan sebagai berikut: 1). Pemodelan sistem berhasil mengacu pada kondisi real Sistem Sumbawa-Bima. Skenario MILP-1 berhasil memperoleh akumulasi biaya fixed cost lebih murah sebesar \$7.122.431,38-, dibandingkan dengan skenario RUPTL PLN dan  $RM \geq 40\%$  tiap tahunnya. Batasan persamaan berhasil membuat pembangkit kandidat terbangun sinkron untuk memproduksi energi. Batasan pertidaksamaan 1 berhasil membatasi nilai  $x_{1-117}$ , sementara pertidaksamaan 2 berhasil membatasi nilai  $x_{235-351}$ . Pertidaksamaan 3 dan 4 mampu membatasi penambahan kapasitas terhadap kebutuhan penambahan kapasitas dan energy demand di tahun terkait. Batasan 5 berhasil membatasi nilai variabel integer serta batasan 6 berhasil menahan pembangkit

```

Editor - C:\Users\T U F\Downloads\PPPT SIDANG\SimulAkhirTA.m
SimulAkhirTA.m
1 fungsi = f;
2
3 intcon = int;
4
5 A = a;
6 B = b;
7 Aeq = aeq;
8 Beq = beq;
9
10 Lb = [];
11 Ub = [];
12
13 [X,FVAL,Exitflag] = intlinprog(fungsi,intcon,A,B,Aeq,Beq,Lb,Ub);
    
```

Gambar 14. Algoritma MILP pada MATLAB.

terbangun untuk terus beroperasi setidaknya hingga akhir waktu studi. 2). Pada tahun 2023, 2024, dan 2026 skenario MILP-2 menghasilkan  $RM \leq 40\%$ , diperoleh bahwa nilainya tidak memenuhi ekspektasi RM minimum untuk sistem di luar Jawa-Bali.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Fatana, "Perencanaan Pengembangan Pembangkit Sistem Muna-Buton dengan Mempertimbangkan Sistem Interkoneksi," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 11, no. 3, hal. 208–214, 2022, doi: 10.22146/jnteti.v11i3.3508.
- [2] BPS Nusa Tenggara Barat, "Provinsi Nusa Tenggara Barat dalam Angka 2022," BPS Provinsi Nusa Tenggara Barat, Mataram, 2022, ISSN: 0215 - 2215.
- [3] PT. PLN (Persero) UIW NTB, "Profil Sistem Kelistrikan PT. PLN (Persero) UIW NTB untuk BPKP," PT. PLN (Persero) UIW NTB, Mataram, 2022.
- [4] PT. PLN (Persero), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN (Persero) 2021-2030," PT. PLN (Persero), Jakarta, 2021.
- [5] S. Nie, Z. C. Huang, G. H. Huang, L. Yu, dan J. Liu, "Optimization of Electric Power Systems with Cost Minimization and Environmental-Impact Mitigation under Multiple Uncertainties," in *Applied Energy*, 2018, vol. 221, hal. 249–267, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.194.
- [6] T. D. Lestari, "Unit Commitment Menggunakan Metode Mixed Integer Linear Programming," Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2021.
- [7] A. Mazer, *Electric Power Planning for Regulated and Deregulated Markets*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007, ISBN: 978-0-470-11882-5.
- [8] R. S. Wibowo dan V. Listianingrum, "Mixed Integer Linear Programming: Binary Programming," Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2022.
- [9] A. N. Alfina, "Unit Commitment Menggunakan Metode Mixed Integer Linear Programming Mempertimbangkan Energy Storage dan Kontrak Energi Take-or-Pay," Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2022.
- [10] M. M. Wahyudi, "Unit Commitment Menggunakan Metode Mixed Integer Linear Programming Mempertimbangkan Batasan Transfer Daya Antara Area," Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2022.
- [11] Institute for Essential Services Reform (IESR), *Making Energy Transition Succeed: A 2023's Update on The Levelized Cost of Electricity and Levelized Cost of Storage in Indonesia*, Jakarta: Institute for Essential Services Reform (IESR), 2023.
- [12] Kementerian ESDM, "Technology Data for the Indonesian Power Sector," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, 2021.