

DINAMIC ECONOMIC DISPATCH (DED) BERBASIS MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING (MILP) DENGAN MEMPERTIMBANGKAN PEMBANGKIT EBT PADA KELISTRIKAN PULAU SUMBAWA

DYNAMIC ECONOMIC DISPATCH (DED) BASED ON MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING (MILP) CONSIDERING EBT GENERATING ON SUMBAWA ISLAND ELECTRICITY

Tri Handoyo Baniantoro¹, Rony Seto Wibowo²

^{1,2}Fakultas Teknik, Magister Inovasi Sistem dan Teknologi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia
triehandoyo42@gmail.com^{1*}

ABSTRACT

In the Dynamic Economic Dispatch (DED) based on Mixed Integer Linear Programming (MILP) for the electricity of Sumbawa Island by considering RE (Renewable Energy) power plants, several aspects need to be considered, namely Variable Addition and Limitations: In the MILP model, the new variable must include the allocation of power from RE sources, such as solar power plants or geothermal power plants. Relevant technical and operational constraints should also be applied, such as capacity limits, characteristic curves and sustainability limits for renewable energy sources. The Sumbawa Island electricity system must consider the technical limitations related to RE Power plants. This includes capacity limitations, sustainability limitations (such as solar radiation levels or water discharge during the dry season), as well as the system's ability to handle variations in power generated by RE Power plants that depend on natural energy sources. One of the challenges in integrating RE Power plants is its variability. Renewable energy sources such as solar and hydropower tend to fluctuate in their power output depending on weather conditions. Therefore, the DED model must consider predictions or estimates of the power generated by RE Power plants to optimize accurate power allocation and minimize operational costs. The simulation results show that the Mixed Integer Linear Programming (MILP) method is able to provide a simple and economical solution to the DED problem. The change in operation using gas fuel and cofiring by 5% is a factor in the existence of minimal fixed power in the system. This thesis is a DED solution using Mixed Integer Linear Programming (MILP) by considering fuel changes as the main consideration in mathematical calculations to determine plant operation. With the change in PLTMG fuel type from B35 to gas, total generation costs decreased by 10.89%. With the change in PLTU fuel type from B35 to gas and PLTU cofiring by 5%, total generation costs decreased by 10.94%.

Keywords: Sumbawa Island, Dinamic Economic Dispatch, Mixed Integer Linear Programming, Renewable Energy.

ABSTRAK.

Dalam Dinamic Economic Dispatch (DED) berbasis Mixed Integer Linear Programming (MILP) untuk kelistrikan Pulau Sumbawa dengan mempertimbangkan pembangkit EBT (Energi Baru dan Terbarukan), beberapa aspek perlu diperhatikan, yaitu Penambahan Variabel dan Batasan: Dalam model MILP. Variabel baru harus mencakup alokasi daya dari sumber EBT, seperti pembangkit tenaga surya (solar power plant) atau pembangkit geothermal (geothermal power plant). Batasan teknis dan operasional yang relevan juga harus diterapkan, seperti batasan kapasitas, kurva karakteristik, dan batasan keberlanjutan untuk sumber energi terbarukan. Sistem kelistrikan Pulau Sumbawa harus mempertimbangkan batasan teknis yang berkaitan dengan pembangkit EBT. Ini termasuk pembatasan kapasitas, pembatasan keberlanjutan (seperti tingkat radiasi matahari atau debit air saat musim kemarau), serta kemampuan sistem untuk menangani variasi daya yang dihasilkan oleh pembangkit EBT yang bergantung pada sumber energi alaminya. Salah satu tantangan dalam mengintegrasikan pembangkit EBT adalah variabilitasnya. Sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan air cenderung mengalami fluktuasi daya produksi mereka tergantung pada kondisi cuaca. Oleh karena itu, model DED harus mempertimbangkan prediksi atau estimasi daya yang dihasilkan oleh pembangkit EBT untuk mengoptimalkan alokasi daya yang akurat dan meminimalkan biaya operasional. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan metode Mixed Integer Linear Programming (MILP) mampu memberikan solusi dari masalah DED secara sederhana dan ekonomis. Perubahan pengoperasian menggunakan bahan bakar gas dan cofiring sebesar 5% menjadi faktor adanya daya tetap minimal pada sistem. Tesis ini adalah penyelesaian DED menggunakan Mixed Integer Linear Programming (MILP) dengan mempertimbangkan perubahan bahan bakar sebagai pertimbangan utama dalam perhitungan matematis untuk menentukan pengoperasian pembangkit. Dengan adanya perubahan

jenis bahan bakar PLTMG dari B35 ke gas, biaya pembangkitan total mengalami penurunan sebesar 10,89 %. Dengan adanya perubahan jenis bahan bakar PLTMG dari B35 ke gas dan cofiring PLTU sebesar 5%, biaya pembangkitan total mengalami penurunan sebesar 10,94 %.

Kata Kunci: Pulau Sumbawa, *Dinamic Economic Dispatch*, *Mixed Integer Linear Programming*, Energi Baru Dan Terbarukan.

PENDAHULUAN

Penjadwalan Penyaluran Daya Ekonomi Dinamis (*Dynamic Economic Dispatch*) berbasis *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) dapat digunakan untuk mengoptimalkan penyaluran daya listrik di Pulau Sumbawa. Pulau Sumbawa memiliki sumber daya energi yang beragam, seperti pembangkit listrik tenaga air, pembangkit listrik tenaga surya, dan pembangkit listrik tenaga diesel. Tujuan dari *Dynamic Economic Dispatch* adalah untuk menentukan alokasi daya yang optimal dari sumber daya yang tersedia dengan mempertimbangkan biaya produksi dan batasan operasional. Dalam pendekatan MILP, masalah optimasi dinyatakan sebagai fungsi tujuan yang harus diminimalkan atau dimaksimalkan, dengan mempertimbangkan sejumlah variabel keputusan yang harus memenuhi batasan linier. Dalam konteks ini, variabel keputusan dapat mencakup alokasi daya yang dihasilkan oleh setiap jenis pembangkit, misalnya, daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga air, pembangkit listrik tenaga surya, dan pembangkit listrik tenaga diesel.

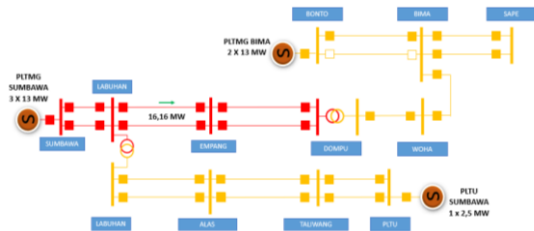
Pertama, data terkait dengan sumber daya yang tersedia, seperti kapasitas pembangkit, biaya operasional, dan batasan teknis harus dikumpulkan. Selanjutnya, model matematis yang mencerminkan tujuan dan batasan masalah harus dirumuskan. Dalam kasus ini, model akan mencakup persamaan linier yang menggambarkan biaya produksi dan batasan daya yang harus dipenuhi oleh setiap pembangkit. Setelah model matematis terbentuk, algoritma optimasi MILP dapat diterapkan untuk menyelesaikan masalah dan mencari solusi optimal. Algoritma ini akan mempertimbangkan biaya produksi, batasan daya, dan faktor-faktor lain yang

relevan untuk menentukan alokasi daya yang optimal.

Dengan menerapkan *Dynamic Economic Dispatch* berbasis MILP, manajer sistem kelistrikan di Pulau Sumbawa dapat mengoptimalkan penyaluran daya listrik dengan mempertimbangkan biaya produksi dan batasan operasional. Hal ini dapat membantu mengurangi biaya operasional sistem kelistrikan, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, dan mengurangi emisi gas rumah kaca dengan mengoptimalkan penggunaan pembangkit listrik yang beragam.

Sistem Tenaga Listrik

Energi listrik sudah menjadi sebuah kebutuhan yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat hingga kemajuan teknologi yang ada saat ini. Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik. Sistem tenaga listrik terbagi menjadi sistem yang lebih spesifik yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi dan sistem distribusi. Sistem pembangkitan berfungsi untuk memberikan sumber energi listrik dari berbagai sumber tenaga yang ada. Sistem tranmisi digunaka untuk menyalurkan energi listrik yang berasal dari sistem pembangkitan menuju sistem distribusi. Sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik ke beban langsung atau konsumen seperti industri, komersil atau perumahan . Untuk diagram sistem pembangkit listrik secara sederhana dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem tenaga Listrik Sistem Pembangkitan

Sistem pembangkitan listrik merupakan tempat energi listrik pertama kali dibangkitkan, dimana terdapat turbin sebagai penggerak awal (primerover) dan generator yang membangkitkan listrik dengan mengubah putaran turbin menjadi energi listrik. Mengoperasikan suatu sistem tenaga listrik yang terdiri atas beberapa sistem pembangkit listrik memerlukan koordinasi yang tepat dan efisien dalam melakukan penjadwalan pembebanan yang harus dibangkitkan setiap masing-masing pembangkit, sehingga diperoleh biaya pembangkit yang minimum.

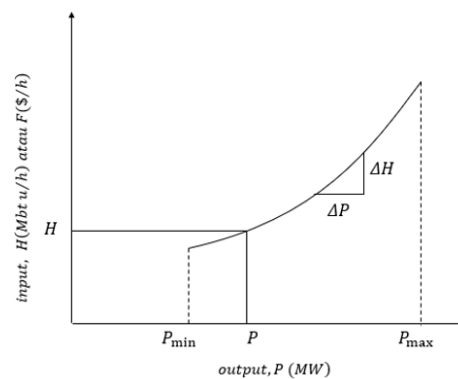


Gambar 2. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Kabupaten Sumbawa Barat

PLTU yang ada di KSB merupakan contoh pembangkit listrik tenaga uap. Ini termasuk generator termal yang digunakan untuk menghasilkan listrik. Pembangkit yang ada di KSB menjadi salah satu sistem dari pembangkit di pulau Sumbawa. Sistem tersebut telah terintegrasi untuk membangkitkan listrik sesuai dengan beban yang ada di pulau Sumbawa. Beberapa pembangkit tersebut akan berkoordinasi sehingga membangkitkan listrik secara optimal dengan biaya yang minimum.

Sistem pembangkitan termal merupakan proses pembangkitan energi listrik menggunakan energi panas (termal). Kurva karakteristik masukan dan keluaran

pembangkit termal ideal secara umum digambarkan sebagai kurva nonlinear yang kontinyu. Kurva tersebut menggambarkan karakteristik Malukan yaitu F (\$/h) atau H (Mbtu/h) dan keluaran daya yang dibangkitkan atau P (MW). Dimana $H = \text{Btu (british thermal unit) per jam}$ dan $F = \text{fuelcost} \times H$ (\$/h). Kurva tersebut menjelaskan bahwa kebutuhan daya yang dibangkitkan akan membutuhkan sebanyak termal (H) setiap jam-nya. Termal atau panas tersebut dapat dikonversi menjadi F (\$/h) atau biaya yang harus dikeluarkan untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan. yang dibangkitkan atau P (MW). Dimana $H = \text{Btu (british thermal unit) per jam}$ dan $F = \text{fuelcost} \times H$ (\$/h). Kurva tersebut menjelaskan bahwa kebutuhan daya yang dibangkitkan akan membutuhkan sebanyak termal (H) setiap jam-nya. Termal atau panas tersebut dapat dikonversi menjadi F (\$/h) atau biaya yang harus dikeluarkan untuk menghasilkan daya.



Gambar 3. Kurva Input Output Pembangkit

Pembebanan Pembangkit

Pembebanan dalam sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian yaitu untuk skala industri, komersil dan perumahan/ rumah tangga. Biasanya pembebanan tersebut dilakukan analisa pada interval dua belas jam atau dua puluh empat jam. Dalam keadaan yang sesungguhnya nilai permintaan beban setiap jam berubah-ubah. Permintaan beban yang tertinggi dalam suatu interval waktu disebut juga beban puncak (peak load). Untuk permasalahan ini

menggunakan beban yang dinamis karena beban akan selalu berubah sesuai dengan permintaan (demand). Faktor beban merupakan perbandingan rata-rata beban dalam periode tertentu dengan beban puncak pada periode tersebut. Faktor beban dapat digunakan untuk menggambarkan siklus pembebanan pada pembangkit di setiap periode tertentu (H. Saadat. 1999).

Economic Dispatch (ED)

Economic dispatch merupakan pembagian pembebanan pada beberapa pembangkit yang terdapat dalam suatu sistem secara optimal dan efisien serta biaya pembangkitan yang minimum (A. J. Wood. 1996). Besar beban pada suatu sistem tenaga selalu berubah pada periode tertentu, oleh karena itu untuk mensuplai beban secara ekonomis maka perhitungan ED dilakukan pada setiap besar beban tersebut.

Dynamic Economic Dispatch

Dynamic Economic Dispatch atau DED merupakan pengembangan dari *Economic Dispatch* (ED). DED adalah pembagian daya yang harus dibangkitkan oleh suatu generator dalam sistem tenaga listrik, sehingga dapat memenuhi kebutuhan beban dengan biaya yang minimum. Beda dengan ED yang hanya melakukan optimasi dengan hanya satu periode beban tertentu, DED akan melakukan optimasi dengan beban yang dinamis, artinya beban akan berubah seiring dengan interval waktu tertentu. Biasanya interval waktu yang digunakan yaitu selama dua belas jam atau dua puluh empat jam. Tujuan dari DED adalah untuk menentukan keluaran daya yang ekonomis dari unit pembangkit yang akan memenuhi kebutuhan beban sesuai dengan batas-batas yang telah ditentukan.

Batasan Cadangan Berputar (Spinning Reserve)

Spinning Reserve Constraint merupakan batas cadangan berputar yang

digunakan untuk security constraint. Untuk memenuhi kebutuhan beban yang bervariasi dan kegagalan daya secara tiba-tiba pada unit pembangkitan yang besar, kebutuhan batas cadangan berputar pada setiap interval waktunya dipertimbangkan pada model persamaan dynamic economic dispatch. Secara umum jumlah batas cadangan berputar mempunyai hubungan relasi yang dekat dengan ramp up rate pada setiap unit (W. Bernard. 2006).

Mixed Integer Linear Programming

Linear programming merupakan teknik model matematika dimana fungsi *linear* dimaksimalkan atau diminimalkan dengan berbagai macam batasan yang diberikan. Teknik ini berfungsi untuk menunjukkan keputusan kuantitatif dalam perencanaan bisnis maupun dalam teknik industri (R. Balamurugan and S. Subramanian. 2008). *Integer linear programming* (ILP) merupakan sebuah model pemrograman linier bilangan bulat yang dapat menghasilkan solusi yang layak untuk memecahkan masalah tanpa melanggar batasan-batasan yang ada (T. Niknam, dkk. 2013). *Mixed integer linear programming* merupakan permasalahan dengan fungsi objek fTx , dimana f merupakan konstanta kolom vektor dan x adalah kolom vektor yang tidak diketahui. Metode ini mengoptimasi fungsi objektif dan mencari nilai variabel optimasi (x) dengan memenuhi batasan persamaan (*equality constraints*) dan batasan pertidaksamaan (*inequality constraints*) yang linier. Istilah matematika, diberikan vektor f , lb , dan ub , matriks A dan Aeq , vektor yang sesuai b dan beq , dan satu set indeks $intcon$, mencari nilai vektor x untuk ditemukan.

Metode Lagrange Multiplier

Metode Lagrange Multiplier dapat diterapkan dalam permasalahan *Dynamic Economic Dispatch* (DED), suatu permasalahan optimasi dalam sistem kelistrikan di mana tujuan utamanya adalah untuk mengalokasikan daya listrik

yang dihasilkan oleh beberapa pembangkit secara optimal dalam kondisi operasional yang berubah-ubah. DED bertujuan untuk meminimalkan biaya operasional dengan mematuhi sejumlah kendala teknis dan operasional.

Posisi Penelitian

Beberapa penelitian sebagai referensi dalam memperkaya bahan kajian pada penelitian ini. Berikut merupakan penelitian terdahulu berupa beberapa jurnal terkait dengan penelitian yang dilakukan penulis.

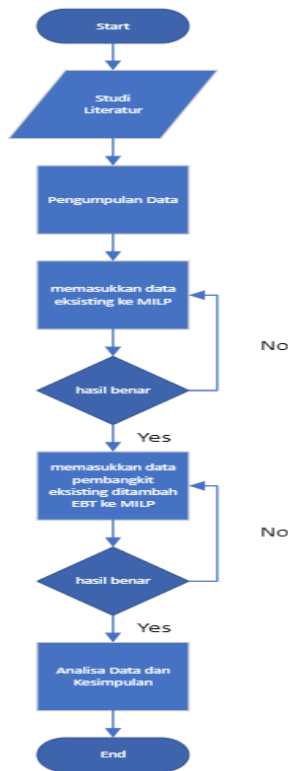
Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Chang G, Chuang C, Lu T, Wu C, (2013)	<i>Frequency-Regulating Reserve Constrained Unit Commitment for an Isolated Power System</i>	Unit commitment dengan batasan frequency-regulating reserve (FRR). Hasil simulasi dibandingkan dengan metode LR dan kondisi existing.
2.	Ahmadi H, Ghasemi H (2014)	<i>Security-Constrained Unit Commitment With Linearized System Frequency Limit Constraints</i>	Fungsi nonlinier minimum frekuensi sistem dilinierkan menggunakan teknik piecewise linearization (PWL).
3.	Sokoler L, Vinter P, [...] Jorgensen J (2016)	<i>Contingency-Constrained Unit Commitment in Meshed Isolated Power Systems</i>	Batasan minimum frekuensi dirumuskan dengan memperhitungkan inersia sistem dan dinamika pembangkit listrik.
4.	Wen Y, Li W, Huang G, Liu X (2016)	<i>Frequency Dynamics Constrained Unit Commitment With Battery Energy Storage</i>	Pengoperasian battery energy storage digunakan untuk mendukung frekuensi yang dinamis pada masalah UC.
5.	Merkert L, Mendros M, Berthold A (2017)	<i>Optimal unit commitment in Microgrids with frequency reserve constraints</i>	Unit commitment dengan batasan cadangan frekuensi berdasarkan berorientasi objek, bahasa pemodelan grafis Modelica yang dioptimasi menggunakan ABB optimizer
6.	Farrokhaba di M, Canizares C, Bhattacharya a K (2018)	<i>Unit Commitment for Isolated Microgrids Considering Frequency Control</i>	Membandingkan kontrol frekuensi single unit, droop load sharing, dan isochronous load sahring (ILS) yang dimasukkan dalam UC.
7.	Nugraha C, Putranto L, Setyonegoro M, Sarjiya, Isnandar S (2020)	<i>Unit Commitment with Primary Frequency Regulation Consideration in the Southern Sulawesi Power System</i>	Membandingkan UC dengan batasan Primary Frequency Regulation (PFR) dengan model UC konvensional
8.	Ferrandon-Cervantes C, Kazemtabri zi B, Troffaes M (2022)	<i>Inclusion of frequency stability constraints in unit commitment using separable programming</i>	Teknik separable programming digunakan untuk melinierkan batasan frekuensi nadir yang non-linier
9.	Awsan Mohammed a.c.*, Ahmed M. Ghaithan a.c, Ahmad Al Hanbali b.c, Ahmed M. Attia b.c (2022)	<i>A multi-objective optimization model based on mixed integer linear programming for sizing a hybrid PV-hydrogen storage system</i>	Dalam tulisan ini, model pemrograman <i>mixed integer linear programming</i> dikembangkan untuk merancang sistem energi terbarukan hybrid PV-hidrogen dengan mempertimbangkan dua fungsi objektif; meminimalkan total <i>life cost</i> dan kemungkinan kehilangan catu daya. Keputusan dari sistem hybrid meliputi jumlah panel PV, jumlah

			tangki hidrogen, itu jumlah elektroliser, jumlah sel bahan bakar, dan jumlah hidrogen yang disimpan waktu.
10.	Maximilian Roth *, Georg Franke, Stephan Rinderknecht (2022)	<i>Decentralised multi-grid coupling for energy supply of a hybrid bus depot using mixed-integer linear programming</i>	Karya ini mengacu pada dua masalah saat ini dalam konteks mencapai netralitas Gas Rumah Kaca (GRK): pertama pembatasan unit pembangkit listrik yang terbarukan dan tidak stabil, dan kedua, pangsa mobilitas yang tinggi domain dalam total emisi GRK.

METODE

Dalam melakukan penelitian ini, dibutuhkan sebuah metode penelitian yang menerangkan alur atau kerangka kerja yang terstruktur dan sistematis. Metode penelitian menjelaskan runtutan sebuah proses yang terdiri dari beberapa tahapan, yang saling terkait dalam sebuah rangkaian proses. Pada bab ini akan dijelaskan tahapan yang akan dilakukan sebelum penelitian dilaksanakan hingga akhir proses penelitian, sehingga proses penyelesaian permasalahan dalam penelitian dapat berjalan dengan baik dan benar. Dalam penyelesaian dibutuhkan adanya informasi lengkap terkait faktor yang berpengaruh atas permasalahan yang akan diselesaikan. Tahapan penelitian dapat lebih jelas dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Flowchart Metodologi Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas hasil simulasi program *Mixed Integer Linear Proqramming* untuk menyelesaikan *dynamic economic dispatch (DED)* dan hasil perhitungan total biaya pembangkitan paling minimum. Hasil dari simulasi program pada tesis ini menggunakan sistem 29 unit generator dengan range waktu 24 jam. Untuk tesis ini ada 3 skenario, yaitu:

1. Skenario 1 yaitu pembangkit PLTMG menggunakan bahan bakar B35, PLTU Sumbawa menggunakan bahan bakar Batubara.
2. Skenario 2 yaitu pembangkit PLTMG menggunakan bahan bakar gas, PLTU Sumbawa menggunakan bahan bakar Batubara.
3. Skenario 3 yaitu pembangkit PLTMG menggunakan bahan bakar gas, PLTU Sumbawa menggunakan bahan bakar Batubara dengan cofiring 5% woodchip.

Data Input Simulasi

Sebelum mensimulasikannya, berikut adalah data input sistem 29 unit generator dengan range waktu 24 jam.

Input Spesifikasi Generator 1 – 29

Berikut adalah spesifikasi generator 1 – 29 yang dipakai dalam pensimulasian dan perhitungan *dynamic economic dispatch (DED)*

Tabel 2. Spesifikasi Input Data Generator 1- 29

No Unit	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Ramp Up (MW/h)	Ramp Down (MW/h)	Up Time (h)	Down Time (h)
1	3.5	7	7.5	7.5	10	8
2	3.5	7	7.5	7.5	10	8
3	0.95	1.9	18	18	10	6
4	0.95	1.9	18	18	10	6
5	7	14	120	120	10	6
6	7.5	15	42	42	8	4
7	7.5	15	42	42	8	4
8	7.5	15	42	42	8	4
9	7.5	15	42	42	8	4
10	7.5	15	42	42	8	4
11	7.5	15	42	42	8	4
12	0.75	1.5	18	18	10	6
13	0.75	1.5	18	18	10	6
14	1.1	2.2	9	9	10	6
15	2	4	36	36	10	6
16	6.5	13	120	120	10	6
17	0.425	0.85	9	9	10	6
18	0.175	0.35	9	9	10	6
19	1.1	2.2	18	18	10	6
20	0.325	0.65	1.8	1.8	10	6
21	3.5	7	12.7	12.7	2	2
22	1.25	2.5	12.7	12.7	2	2
23	1.9	3.8	12.7	12.7	2	2
24	2.5	5			2	2
25	2.5	5			2	2
26	5	10			2	2
27	5	10			2	2
28	5	10			2	2
29	0.26	0.52	0.52	0.52	2	2

Input Kebutuhan Beban per Jam

Berikut adalah input kebutuhan beban selama 24 jam. Dimana kita liat setiap jamnya memiliki load berbeda beda dan puncaknya berada di jam 18 – 20.

Tabel 3. Tabel Beban per 30 menit Selama 24 Jam (00.30-12.00)

yang dikonsiderasikan dalam memenuhi semua kondisi batasan. Batasan generator limit, kondisi mati nyala generator, ramp rate generator, up time, dan down time.

Dari sini fungsi objektif yang disimulasikan dengan metode MILP di matlab mendapatkan biaya paling minimum untuk 3 scenario. Dalam mempertimbangkan scenario 1,2 dan 3, kita dapat melihat bahwa adanya perubahan bahan bakar pada PLTMG dan PLTU dapat mempengaruhi kombinasi dalam optimasi DED. Dari simulasi ini didapat skenario 1 didapat biaya pengoperasian selama 24 jam adalah 8.406.941.000,00 Rupiah. Untuk skenario 2 didapat biaya pengoperasian selama 24 jam adalah 7.491.427.000,00 Rupiah. Dan skenario 3 didapat biaya pengoperasian selama 24 jam adalah 7.486.907.000,00 Rupiah.

Tabel 29. Perbandingan Biaya Pengoperasian 3 Skenario



Dari table 29 dapat disimpulkan bahwa biaya pengoperasian dengan PLTMG menggunakan bahan bakar gas dan PLTU cofiring sebesar 5% paling efisien yaitu sebesar 7,486 Milliar Rupiah.

SIMPULAN

Dari hasil simulasi, dapat ditarik kesimpulan berikut:

1. Hasil simulasi dari sistem 29 generator, sudah memenuhi permintaan beban dengan kemungkinan cost atau fungsi objektif paling minimum, tanpa melanggar semua batasan persamaan maupun pertidaksamaan yang telah dipertimbangkan.

2. Dengan adanya pertimbangan perubahan jenis bahan bakar, tidak akan merubah kombinasi besaran daya yang dibangkitkan generator terutama dalam membatasi total daya yang dibangkitkan tetapi mempengaruhi biaya pengoperasian, tanpa melanggar batasan lain dalam simulasi.
3. Dengan adanya perubahan jenis bahan bakar PLTMG dari B35 ke gas, biaya pembangkitan total mengalami penurunan sebesar 10,89 %.
4. Dengan adanya perubahan jenis bahan bakar PLTMG dari B35 ke gas dan cofiring PLTU sebesar 5%, biaya pembangkitan total mengalami penurunan sebesar 10,94 %.

Saran

Saran untuk penelitian kedepan adalah:

1. Memperhitungkan batasan lain seperti contohnya batasan cadangan berputar. Dimana total cadangan berputar harus lebih besar dari kapasitas generator terbesar.
2. Penelitian dapat dikembangkan dengan menggunakan metode yang berbeda seperti *Artificial Intelligent* untuk mendapatkan metode yang paling sesuai.
3. Memperhitungkan Batasan lain, yaitu penambahan jam kerja pembangkit agar dapat mengatur overhaul pembangkit agar tidak overhaul bersamaan pada waktu yang sama.

DAFTAR PUSTAKA

- A. J. Wood, Power Generation Operation and Control, New York: A Wiley-Interscience Publication, 1996.
- E. Castillo, C. A.J, P. Padregal, R. Gracia and N. ALguacil, Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science, Pure and Applied Mathematics Series, New York: Wiley, 2002.
- G. W. Chang, C. S. Chuang, T. K. Lu, and C. C. Wu, "Frequency- regulating reserve constrained unit commitment

- for an isolated power system," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 578– 586, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2208126
- H. Saadat, *Power System Analysis*, New York: The McGraw- Hill Companies, 1999.
- L. E. Sokoler, P. Vinter, R. Baerentsen, K. Edlund, and J. B. Jorgensen, "Contingency-Constrained Unit Commitment in Meshed Isolated Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 3516– 3526, Sep. 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2485781
- P. Attaviriyanupap, H. Kita, E. Tanaka and J. Hasegawa, "A hybrid EP and SQP for dynamic economic dispatch with nonsmooth fuel cost function," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, pp. 411-416, 2002.
- R. Balamurugan and S. Subramanian, "Differential Evolution- based Dynamic Economic Dispatch of Generating Units with Valve-point Effects," *Electric Power Components and Systems*, pp. 828-843, 2008.
- Roth, M., Franke, G., & Rinderknecht, S. (2022). Decentralised multi-grid coupling for energy supply of a hybrid bus depot using mixed-integer linear programming. *Smart Energy*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100090>
- Mohammed, A., Ghathani, A. M., Al-Hanbali, A., & Attia, A. M. (2023). A multi-objective optimization model based on mixed integer linear programming for sizing a hybrid PV-hydrogen storage system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(26), 9748–9761. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.060>.
- T. Niknam, R. Azizipanah-Abarghooee and J. Aghaei, "A new modified teaching-learning algorithm for reserve constrained dynamic economic dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 749-763, 2013.
- W. Bernard, *Introduction to Management Science*, Ninth Edition, Virginia: Prentice Hall, 2006
- W. Zhaolong, D. Jianying, H. W. Q, J. Zhaoxia and Z. Jiehui, "Reserve Constrained Dynamic Economic Dispatch with Valve-point Effect: A Two-stage Mixed Integer Linear Programming Approach," *CSEE Journal Of Power and Energy System*, vol. 3, pp. 203-211, 2017.