

Optimasi Biaya Bahan Bakar pada Permasalahan *Unit commitment* Sistem *Microgrid* Kabupaten Sumbawa

Indra Darmawan¹, Tri Susilawati²

¹Department of Electrical Engineering, Universitas Teknologi Sumbawa, Indonesia

²Department of Civil Engineering, Universitas Teknologi Sumbawa, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 02 April 2025

Revised: 10 Mei 2025

Accepted: 30 Juni 2025

Keywords:

Optimasi

Unit commitment

Microgrid

Enumerasi

EBT

Published by

Impression : Jurnal Teknologi dan Informasi

Copyright © 2025 by the Author(s) | This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

Salah satu komponen terbesar dalam sistem tenaga listrik yaitu biaya bahan bakar. Salah satu solusi untuk meminimalkan permasalahan tersebut adalah sistem *microgrid*. Konsep *microgrid* ini mengombinasikan antara pembangkit termal dengan pembangkit energi baru terbarukan (EBT). Integrasi antara kedua jenis pembangkit harus baik untuk mencapai sistem keandalan yang baik pula. Salah satu cara untuk mengoptimalkan penggunaan kedua sistem pembangkit ini yaitu penerapan *unit commitment* (UC). UC merupakan cara operasi ekonomis, untuk melakukan penjadwalan operasi setiap unit pembangkit pada periode waktu tertentu. Fokus penelitian ini adalah penyelesaian permasalahan *unit commitment* untuk sistem kelistrikan *microgrid* di Kabupaten Sumbawa. Pada proses penyelesaiannya dikembangkan 2 model yaitu: model pertama seluruh sistem dilayani pembangkit diesel dan model kedua integrasi pembangkit diesel, pembangkit angin, panel surya dan baterai dengan penetrasi 5%, 10% dan 15%. Metode enumerasi digunakan sebagai metode penyelesaian. Tujuan dilakukannya penelitian ini selain untuk meminimalkan biaya bahan bakar juga ingin diketahui seberapa baik metode enumerasi dalam menyelesaikan masalah. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh efisiensi biaya pada sistem *microgrid* pada setiap penetrasi sebesar 6%, 12% dan 18% jika dibandingkan sistem pembangkit yang menggunakan pembangkit diesel saja.

One of the largest components in the electric power system is the cost of fuel. One solution to minimize this problem is the *microgrid* system. This *microgrid* concept combines thermal power plants with renewable energy (EBT) power plants. Integration between the two types of power plants must be good to achieve a good reliability system. One way to optimize the use of these two power plant systems is the application of *unit commitment* (UC). UC is an economical operating method, to schedule the operation of each power plant unit in a certain period of time. The focus of this study is solving the *unit commitment* problem for the *microgrid* electricity system in Sumbawa Regency. In the solution process, 2 models were developed, namely: the first model, the entire system is served by diesel power plants and the second model, the integration of diesel power plants, wind power plants, solar panels and batteries with penetration of 5%, 10% and 15%. The enumeration method is used as a solution method. The purpose of this study, in addition to minimizing fuel costs, is also to find out how good the enumeration method is in solving the problem. Based on the calculation results, the cost efficiency of the *microgrid* system at each penetration is 6%, 12% and 18% when compared to the generating system that only uses diesel generators.

Corresponding Author:

Indra Darmawan

Department of Electrical Engineering, Universitas Teknologi Sumbawa, Indonesia

Jl. Raya Olat Maras Dusun Batu Alang Kecamatan Moyo Hulu., Kabupaten Sumbawa, Nusa Tenggara Barat, Indonesia 84371

Email: indra.darmawan@uts.ac.id

PENDAHULUAN

Energi listrik saat ini sudah menjadi kebutuhan dasar yang penting bagi kehidupan manusia, karena hampir semua aktivitas yang dilakukan manusia selalu membutuhkan energi listrik. Berkembangnya teknologi dan aktivitas manusia yang beragam dalam mengonsumsi listrik menyebabkan tingginya kebutuhan energi listrik. Pertumbuhan konsumsi listrik yang semakin meningkat setiap tahunnya harus diimbangi dengan suplai yang cukup dari pusat pembangkit listrik. Untuk memenuhi suplai energi listrik maka perlu adanya pengembangan pembangkit, karena tidak mungkin terpenuhi oleh satu pembangkit saja. Suplai energi listrik umumnya didukung oleh sistem kelistrikan yang terdiri dari beberapa pembangkit yang saling bekerja sama (Utama et al., 2016).

Energi listrik telah menjadi kebutuhan dasar penting dalam kehidupan modern. Hampir seluruh aktivitas mencerminkan ketergantungan pada listrik. Data terbaru menunjukkan bahwa konsumsi listrik nasional pada tahun 2024 mencapai sekitar 306 miliar kWh, meningkat dari 288 miliar kWh di tahun 2023. Rata-rata pertumbuhan tahunan sejak 2013 mencapai +4 %/tahun (Yafi et al., 2023). Sementara itu, emisi CO₂ dari sektor listrik telah meningkat tajam seiring dominasi bahan bakar fosil, naik 86 MtCO₂ sejak 2013 sampai 2023, dengan intensitas karbon sekitar 625 gCO₂eq/kWh.

Dampak yang ditimbulkan dari jumlah pembangkit adalah meningkat pula jumlah konsumsi bahan bakar, yang mana konsumsi bahan bakar merupakan salah satu komponen biaya terbesar dalam sistem tenaga listrik (Nugroho Soelami et al., 2020). Siklus yang terbentuk dari hubungan antara kebutuhan energi, konsumsi bahan bakar dan pembangkit yang tidak bisa terpisahkan satu sama lainnya. Jika salah satunya meningkat maka komponen lainnya juga akan ikut meningkat, begitu pula sebaliknya. Salah satu efek yang dirasa dari kenaikan penggunaan bahan bakar adalah pada harga jual energi listrik yang tentunya juga akan meningkat.

Selain efek kenaikan penggunaan bahan bakar, efek lain yang ditimbulkan dari konsumsi listrik berbahan bakar fosil yakni peningkatan emisi karbon yang dihasilkan. Berdasarkan data tahun 2024 penggunaan energi fosil untuk kebutuhan listrik di Indonesia yakni sekitar 85% dari total kebutuhan listrik nasional dan masih sekitar 15% penggunaan energi baru terbarukan (EBT) sebagai energi alternatif. Hal ini menempatkan Indonesia sebagai negara terbesar subsidi energi fosil di ASEAN dan menduduki peringkat ke- 8 di dunia (Hasjanah, 2024). Sementara itu, target RUPTL 2025–2034 menargetkan peningkatan bauran energi baru terbarukan (EBT) hingga 23 % dari total bauran nasional. Namun perlu strategi terintegrasi untuk menjawab tantangan keandalan sistem interkoneksi dengan EBT.

Salah satu solusi yang bisa menyelesaikan permasalahan konsumsi bahan bakar ini adalah dengan memanfaatkan EBT. Salah satu masalah yang timbul diakibatkan integrasi antara pembangkit termal dan pembangkit EBT adalah keandalan saat dilakukan proses interkoneksi. Sistem bauran energi dan jaringan mikro dapat memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi sistem energi terdistribusi dan mendukung peningkatan penetrasi sumber daya terbarukan, dengan berperan sebagai pusat kendali untuk pengelolaan sumber daya energi terdistribusi secara optimal (Moretti et al., 2020). Jaringan pintar meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik, memungkinkan penggunaan energi yang lebih efisien dan memberikan pengetahuan dan kontrol sistem yang lebih baik (Deckmyn et al., 2017).

Sumber EBT yang ingin diintegrasikan pada penelitian ini yakni baterai, panel surya dan angin yang merupakan salah satu sumber energi yang berlimpah di Sumbawa. Sejalan dengan rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) tahun 2025-2034 yang menargetkan bauran EBT mencapai 23%. Adapun penetrasi yang disimulasikan pada penelitian ini yakni 5%, 10% dan 15%. Hal ini dilakukan mengingat bauran EBT masih sangat sulit terimplementasi secara maksimal atau besar mengingat investasi di bidang ini masih cukup mahal dibanding energi fosil yang berefek pada harga jual listrik bagi konsumen.

Salah satu cara optimasi yang bisa dilakukan adalah dengan penerapan *unit commitment* (UC) yang bertujuan meminimalkan total biaya pembangkitan listrik dalam periode tertentu, dengan menentukan penjadwalan unit pembangkit yang memadai (Abdou & Tkiouat, 2018). Proses penjadwalan ini digunakan untuk meminimalkan penggunaan bahan bakar dengan penggunaan sumber pembangkit

EBT yakni angin, panel surya serta baterai. Optimasi EBT juga diharapkan guna meminimalkan emisi karbon yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengkaji bagaimana integrasi energi baru terbarukan (EBT) seperti surya, angin, dan baterai ke dalam sistem kelistrikan berbasis fosil dapat dioptimalkan melalui pendekatan *unit commitment* (UC). Fokus penelitian berada pada wilayah Sumbawa, yang memiliki potensi EBT tinggi namun masih sangat bergantung pada pembangkit berbahan bakar fosil. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi nyata dalam bentuk model optimasi pembangkitan yang dapat menurunkan biaya bahan bakar, mengurangi emisi karbon, serta meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik di daerah terpencil. Dari sisi akademis, penelitian ini menawarkan pendekatan integratif UC dan EBT dalam konteks lokal Indonesia, yang belum banyak dibahas dalam kajian sebelumnya. Hasil studi ini diharapkan menjadi referensi strategis dalam mendukung kebijakan transisi energi nasional menuju sistem kelistrikan yang lebih berkelanjutan dan efisien.

URAIAN TEORI

Sistem *Microgrid*

Sistem *microgrid* merupakan sistem kelistrikan yang terdistribusi dengan berbagai sumber energi, salah satunya adalah EBT (Maharani et al., 2024). Sistem *microgrid* ini sangat tepat digunakan di daerah terisolasi dan daerah kepulauan sebagai sistem alternatif (Khan et al., 2024). Secara sistem *microgrid* ini dapat membantu meningkatkan jumlah elektrifikasi dan penurunan ketergantungan pada energi fosil yang cukup signifikan (Shafiullah et al., 2022). Penggunaan dan pemanfaatan sumber daya EBT lokal dalam sistem *microgrid* menjadikan sistem ini sangat efektif jika diterapkan di daerah-daerah kepulauan seperti Indonesia.

Operasi Sistem Tenaga Listrik

Operasi sistem tenaga listrik bertujuan untuk mengatur dan mengendalikan sistem pembangkit, transmisi dan distribusi listrik kepada konsumen agar terjamin tetap andal, ekonomis, efisien dan aman (Mirsaeidi et al., 2023). Operasi sistem listrik terbaik harusnya mengintegrasikan berbagai macam sumber energi (Deng et al., 2022).

Unit Pembangkit Termal

Pembangkit listrik dalam sistem tenaga listrik secara umum dibagi menjadi dua kelompok, pembangkit termal dan pembangkit non termal. Pembangkit termal terdiri PLTU, PLTD, PLTN dan PLTGU (Sapto Nisworo et al., 2023). Beberapa aspek penting dalam operasi sistem tenaga listrik antara lain *load Forecasting* (peramalan beban) untuk memastikan kesiapan pembangkitan, *economic dispatch* (ED) mengatur pembebanan unit pembangkit agar biaya operasi minimum, *unit commitment* (UC) untuk menentukan pembangkit mana yang harus dinyalakan/mati pada waktu tertentu, *power flow* (Aliran Daya) untuk menghitung aliran daya pada tiap jalur untuk memastikan sistem tidak kelebihan energi serta *frequency and voltage control* untuk menjaga kualitas daya (Adytia Putra & Nazir, 2023)

Unit commitment Pembangkit Termal

Unit commitment merupakan penjadwalan unit pembangkit yang melayani beban pada periode waktu tertentu. Masalah UC merupakan masalah optimasi yang memiliki fungsi tujuan yang harus diselesaikan (Montero et al., 2022). Untuk fungsi objektif dari UC secara umum (Mohammad Masih Sediqi et al., 2017):

$$\text{Min } TC = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n [F_i(P_{i,t}) + SC_i(1 - U_{1,t})]u_{i,t} \quad (1)$$

Dimana TC merupakan biaya total bahan bakar, $F_i(P_{i,t})$ merupakan fungsi biaya unit i pembangkit termal pada waktu t , SC_i biaya *start-off* unit pembangkit i , dan $U_{1,t}$ merupakan variabel status unit pembangkit i pada waktu t . Biaya *start-off* pembangkit diberikan persamaan:

$$SC_i = \begin{cases} h - costt_i; T_i^{off} \leq X_i^{off} \leq T_i^{off} + c - s - hour_i \\ h - costt_i; X_i^{off} > T_i^{off} + c - s - hour_i \end{cases} \quad (2)$$

Untuk faktor kendalanya sebagai berikut:

1. Keseimbangan daya.

$$load(t) = \sum_i^N P_i - l \quad (3)$$

Dimana $load(t)$ adalah beban pada waktu t , dan P_i , masing-masing total produksi pembangkit termal, dan l adalah rugi saluran transmisi.

2. Kapasitas pembangkit.

$$p_{i,min} \ll p_{i,t} \ll p_{i,max} \quad (4)$$

Dimana $p_{i,min}$ dan $p_{i,max}$ adalah kapasitas minimum dan maksimum pembangkit termal.

3. Minimum up/down time pembangkit.

$$\begin{aligned} T_i^{on} &\gg MUT_i \\ T_i^{off} &\gg MDT_i \end{aligned} \quad (5)$$

Dimana, T_i^{on} = total waktu minimum up unit i , MUT_i waktu minimum up time unit i .

4. Ramp rate.

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq UR_i, \text{ if generation increases} \quad (6)$$

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq DR_i, \text{ if generation decreases} \quad (7)$$

Dimana UR_i ramp up dan DR_i ramp down pada unit i

5. Cadangan daya.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^p (P_{i,t}) u_{i,t} \geq load^t + R_t \quad (8)$$

Keterkaitan Konsep: Microgrid, Operasi Sistem Tenaga Listrik, dan Unit commitment

Dalam menghadapi tantangan transisi energi menuju sistem kelistrikan yang lebih berkelanjutan, diperlukan integrasi antara berbagai komponen sistem tenaga: struktur jaringan (*microgrid*), operasi sistem tenaga listrik, dan strategi optimasi (*unit commitment*). Ketiga elemen ini saling terkait: *microgrid* menyediakan platform fleksibel bagi energi baru terbarukan (EBT), operasi sistem tenaga listrik menjamin kelangsungan dan efisiensi sistem, sedangkan *unit commitment* memastikan perencanaan operasional yang optimal terutama saat integrasi EBT yang bersifat fluktuatif.

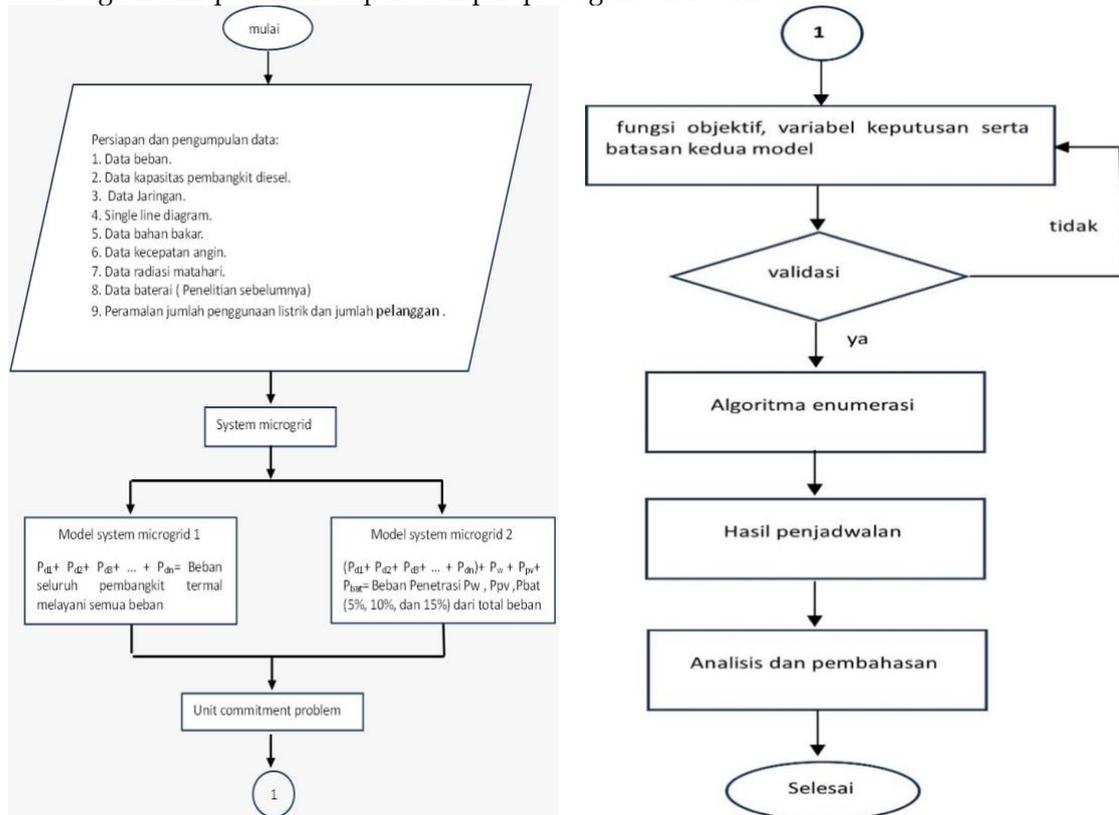
METODE PENELITIAN

Pendekatan yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini yaitu pendekatan literatur dan pendekatan simulasi. Pendekatan literatur digunakan dilakukan untuk menyusun landasan teoritis, memahami konsep sistem *microgrid*, serta mengidentifikasi karakteristik teknis pembangkit EBT (angin, panel surya, dan baterai) yang relevan dengan kondisi lokal Kabupaten Sumbawa. Literatur juga dijadikan rujukan dalam pemilihan metode penyelesaian UC, termasuk parameter teknis yang digunakan dalam simulasi dan batasan sistem.

Pendekatan selanjutnya yang digunakan adalah pendekatan simulasi yang menggunakan metode enumerasi untuk menyelesaikan permasalahan terkait UC. Pendekatan simulasi digunakan untuk membangun model kelistrikan berbasis *microgrid* dan melakukan analisis performa operasional melalui penyelesaian masalah UC. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Mathlab* dengan dukungan pemrograman berbasis formula untuk metode enumerasi. Parameter yang disimulasikan meliputi: biaya bahan bakar, konsumsi bahan bakar, total biaya operasional, jam operasi pembangkit serta pengaruh penetrasi EBT terhadap stabilitas dan efisiensi sistem. Dua model yang akan dikembangkan

yaitu model pembangkit termal dengan sumber utama pembangkit adalah diesel. Model kedua yaitu dengan menambahkan pembangkit yang bersumber dari energi baru terbarukan (EBT) yaitu angin, panel surya dan baterai. Pendekatan ini digunakan untuk mengetahui perbandingan antara pembangkit termal dan pembangkit EBT.

Diagram alir penelitian seperti tampak pada gambar 1 berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini yakni data sekunder yang bersumber dari BMKG dan PT. PLN (Persero) Kabupaten Sumbawa. Selain itu data yang bersumber dari penelitian sebelumnya digunakan untuk memperkuat hasil penelitian. Adapun data yang digunakan dalam penelitian ini seperti pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Data Penelitian

Data	Klasifikasi	Sumber
Data Pembebanan Listrik	1. Data pembebanan harian	PT. PLN (Persero) Kabupaten Sumbawa
	2. Data beban bulanan	
	3. Data beban tahunan	
Data Pembangkit	1. Jumlah pembangkit	PT. PLN (Persero) Kabupaten Sumbawa
	2. Jenis pembangkit	
	3. Jenis bahan bakar pembangkit	
	4. Single line diagram	

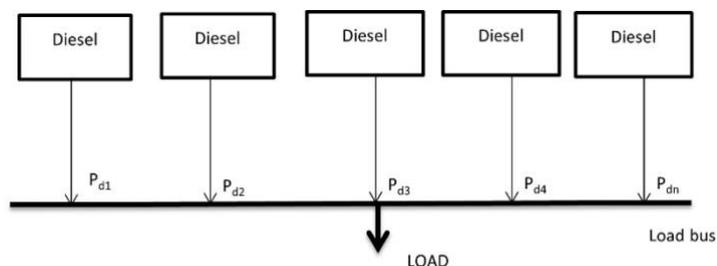
Data bahan bakar	1. Jumlah bahan bakar 2. Harga bahan bakar 3. Kapasitas bahan bakar setiap pembangkit	PT. PLN (Persero) Kabupaten Sumbawa
Data matahari	Radiasi matahari	BMKG Sumbawa
Data angin	Kecepatan angin	BMKG Sumbawa

Tahap Pengembangan Sistem *Microgrid*

Berdasarkan hasil olah data dan peramalan pada tahap persiapan, selanjutnya yaitu tahap proses pemodelan untuk sistem *microgrid* dalam melayani beban. Ada dua model sistem *microgrid* yang dikembangkan yakni model pertama merupakan sistem kelistrikan di Kabupaten Sumbawa yang menggunakan bahan bakar fosil secara keseluruhan. Kemudian untuk model kedua dengan penambahan pembangkit angin, panel surya dan baterai dalam menyuplai beban.

Model 1

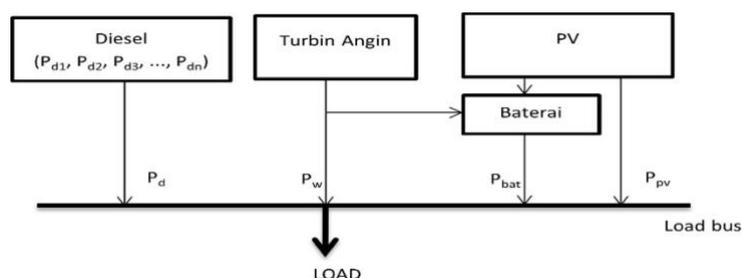
Sistem *microgrid* model 1 merupakan sistem *microgrid* yang saat ini diterapkan di Kabupaten Sumbawa. Pembangkit dengan model pertama merupakan pembangkit diesel dengan bahan bakar utama *high speed diesel* (HSD) dan *marine fuel oil* (MFO). Gambar sistem *microgrid* model 1 sebagaimana pada gambar 2 berikut:



Gambar 2. Sistem *microgrid* model 1

Model 2

Model 2 merupakan model pengembangan yang mengintegrasikan sistem *microgrid* model 1 dikombinasikan dengan sumber energi lainnya seperti angin, panel surya dan baterai. Pada model 2 ini penggunaan EBT tidak sepenuhnya digunakan sebagai beban utama oleh sebab itu dibuat 3 skenario yakni penetrasi 5%, 10% dan 15% untuk penggunaan EBT. Model 2 sistem *microgrid* seperti pada gambar 3 berikut:



Gambar 3. Sistem *microgrid* model 2

Penyelesaian *Unit commitment* (UC)

Metode enumerasi dipilih dalam penyelesaian masalah UC karena:

1. Kesesuaian skala sistem: Sistem kelistrikan Kabupaten Sumbawa memiliki jumlah unit pembangkit yang relatif terbatas, sehingga enumerasi masih dapat dilakukan tanpa kompleksitas komputasi yang berlebihan.
2. Kejelasan solusi optimal: Enumerasi menjamin hasil yang benar-benar optimal karena mengevaluasi semua kemungkinan kombinasi status unit pembangkit.
3. Sifat deterministik: Berbeda dengan metode heuristik (seperti *Genetic Algorithm*) atau pendekatan perkiraan (seperti *Lagrangian relaxation*), enumerasi memberikan kontrol penuh terhadap setiap parameter dan memungkinkan pemahaman yang lebih intuitif terhadap pengaruh masing-masing variabel terhadap hasil akhir.

Meski metode lain seperti *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP), *Dynamic Programming*, atau *Stochastic Optimization* memiliki keunggulan dalam skala besar dan sistem kompleks, metode enumerasi lebih tepat untuk penelitian ini yang fokus pada sistem *isolated microgrid* berukuran kecil hingga menengah. Penetrasi yang disimulasikan pada penelitian dibatasi pada 5%, 10% dan 15% dikarenakan: Keterbatasan investasi awal untuk sistem penyimpanan dan pembangkit EBT,

1. Ketergantungan pada kondisi cuaca menyebabkan potensi fluktuasi daya,
2. Kapasitas respon sistem termal terhadap intermittency,
3. Realisasi bertahap sesuai target nasional RUPTL 2025–2034.

Penyelesaian UC pada penelitian ini menggunakan *software* MATLAB R2017b sebagai *tools*.

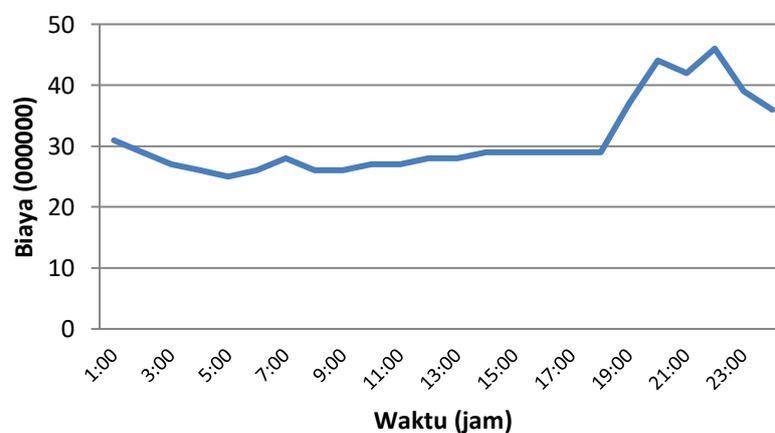
HASIL PENELITIAN

Penelitian ini membandingkan total biaya bahan bakar harian dari dua sistem pembangkit listrik:

1. Model 1: Sistem *microgrid* berbasis pembangkit termal murni (diesel), dan
2. Model 2: Sistem hibrida yang mengintegrasikan pembangkit energi baru terbarukan (EBT) berupa turbin angin (Pw), panel surya (Pv), dan baterai penyimpanan (Bat), dengan tiga tingkat penetrasi EBT sebesar 5%, 10%, dan 15% terhadap total beban.

Kinerja masing-masing model dievaluasi berdasarkan penjadwalan operasi unit pembangkit konvensional (P1–P5) dan unit EBT (Pw, Pv, Bat) menggunakan metode enumerasi untuk menyelesaikan masalah *unit commitment* (UC). Tujuan utama adalah meminimalkan biaya bahan bakar harian, dengan mempertimbangkan konfigurasi unit yang optimal per jam.

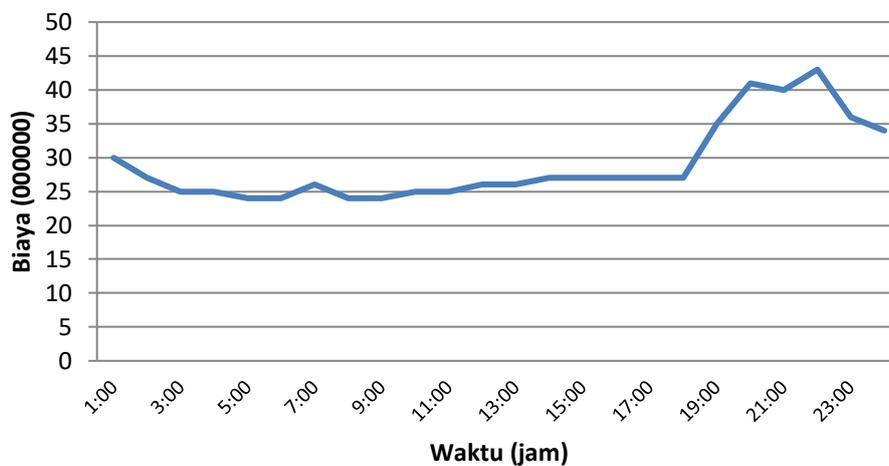
Model 1



Gambar 4. Grafik Biaya Model 1

Berdasarkan hasil perhitungan pada model 1 diperoleh biaya bahan bakar per hari sebesar Rp. 755.986.557. Solusi maksimum terjadi pada Pukul 22.00 sebesar Rp. 46.585.395 dan untuk solusi minimum terjadi pada pukul 05.00 sebesar Rp. 25.862.494. Waktu komputasi yang diperlukan oleh metode enumerasi untuk memperoleh solusi optimum adalah 24 detik.

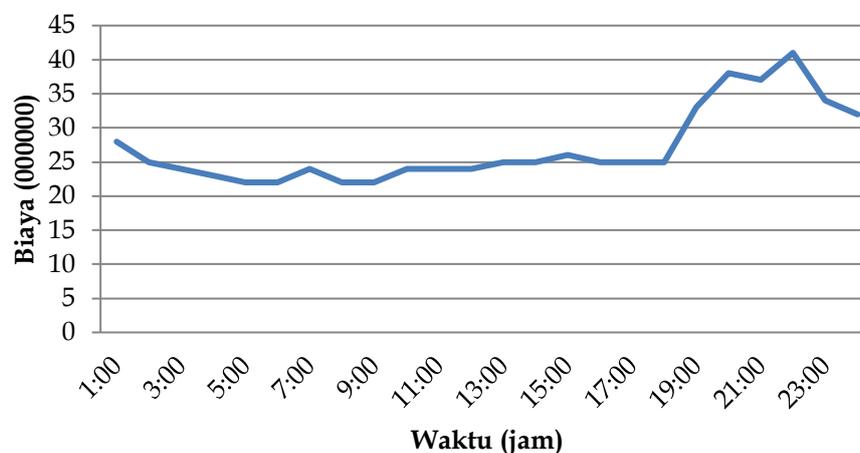
Model 2 Penetrasi 5%



Gambar 5. Grafik Bahan Bakar Model UC 2 Penetrasi 5%

Biaya bahan bakar per hari yang dibutuhkan pada model 2 penetrasi 5% yakni sebesar Rp. 708.195.902. Nilai maksimum terjadi pada Pukul 22.00 sebesar Rp. 43.806.100 dan nilai minimum terjadi pada pukul 05.00 sebesar Rp. 24.143.623. Waktu komputasi yang diperlukan untuk memperoleh solusi optimum rata-rata adalah 22 detik.

Penetrasi 10%

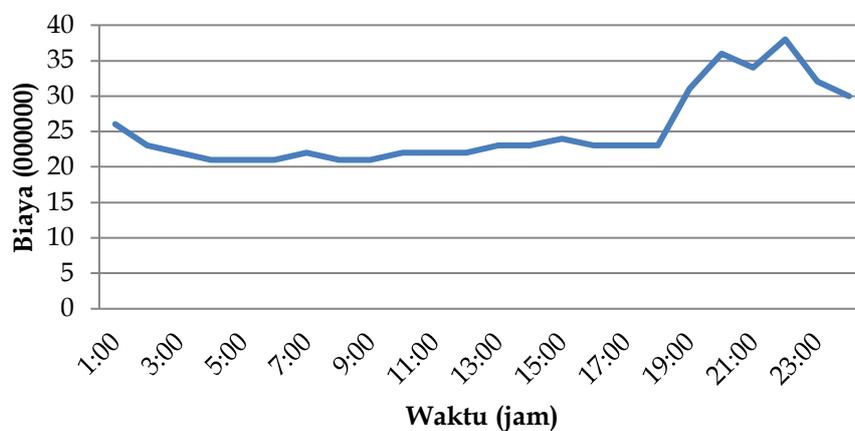


Gambar 6. Grafik Biaya Bahan Bakar Model UC 2 Penetrasi 10%

Model 2 dengan penetrasi 10% diperoleh biaya produksi per hari sebesar Rp. 660.707.646. Nilai maksimum terjadi pada Pukul 22.00 sebesar Rp. 41.026.805 dan nilai minimum terjadi pada pukul 05.00 sebesar Rp. 22.631.984. Waktu komputasi yang diperlukan memperoleh solusi optimum adalah 22 detik.

Penetrasi 15%

Unit commitment untuk model kedua pada porsi penetrasi pembangkit angin, panel surya dan baterai 15% disajikan dalam grafik 7 berikut:



Gambar 7. Grafik Biaya Bahan Bakar Model UC 2 Penetrasi 15%

Hasil *unit commitment* yang dilakukan menggunakan metode enumerasi dengan penetrasi 15% pada diperoleh biaya bahan bakar selama 1 hari sebesar Rp. 615.143.176. Biaya maksimum terjadi pada Pukul 22.00 sebesar Rp. 38.247.511 dan untuk biaya minimum terjadi pada pukul 05.00 sebesar Rp 21.087.466. Waktu komputasi yang diperlukan oleh enumerasi untuk memperoleh solusi optimum adalah 20 detik

Simulasi menunjukkan bahwa Model 1 (termal murni) menghasilkan total biaya harian sebesar Rp 755.986.557. Ketergantungan penuh terhadap PLTD menyebabkan tingginya beban operasional harian, terutama pada jam beban puncak (pukul 22.00). Sebaliknya, Model 2 yang mengintegrasikan EBT menunjukkan penurunan biaya bertahap seperti ditampilkan pada tabel 2 berikut:

Tabel 2. Perbandingan Efisiensi Antar Model

Model	Penetrasi EBT	Total Biaya (Rp)	Efisiensi VS Model 1	Penghematan Absolut (Rp)
Model 1 - Termal murni	0%	755.986.557	-	-
Model 2 - Hybrid EBT	5%	708.195.902	6,32%	±Rp 47 juta
Model 2 - Hybrid EBT	10%	660.707.646	12,6%	±Rp 95 juta
Model 2 - Hybrid EBT	15%	615.143.176	18,6%	±Rp 141 juta

PEMBAHASAN

Sistem ketenagalistrikan di wilayah PT PLN (Persero) area Sumbawa merupakan sistem radial dengan sistem jaringan 20 kV (*single line diagram*). Sistem kelistrikan Sumbawa dibagi menjadi tiga sub-

sistem yaitu sub-sistem Taliwang, sub-sistem Labuhan dan sub-sistem Empang. Pada sistem area Sumbawa di suplai oleh 5 pembangkit Besar yaitu:

1. PLTD Labuhan Sumbawa menyuplai 7 penyulang sebagai PLTD utama.
2. PLTD Taliwang melalui 4 penyulang daerah sekitar Taliwang dan Kab. Sumbawa Barat.
3. PLTD Alas menyuplai 2 penyulang daerah Alas.
4. PLTD Empang menyuplai 3 penyulang daerah Empang.
5. Dan PLTD Sewa, BOAK dan BGS Badas.

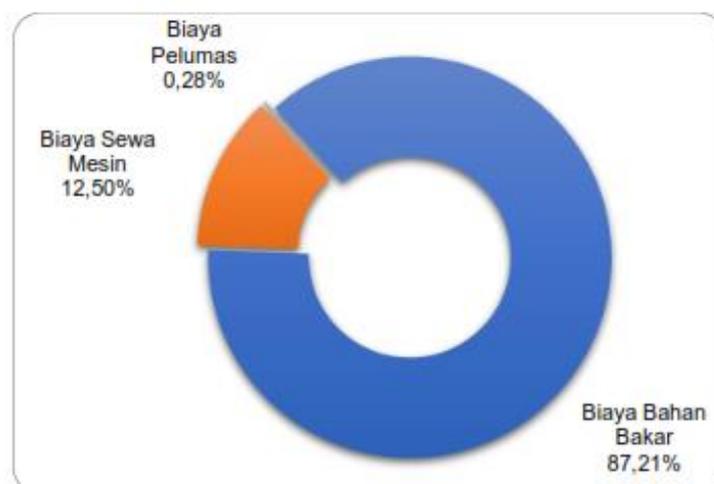
Selain PLTD besar terdapat beberapa PLTD kecil yang masing-masing melayani beban di wilayah kecamatan atau desa di wilayah area PT PLN Sumbawa yaitu: PLTD Lunyuk, Lebin, Lantung, Klawis, Labuhan Aji, Medang, Sebotok, PLTMH Mamak. Sub-sistem labuhan sendiri merupakan sub-sistem dengan tingkat beban tertinggi dibandingkan dengan sub sistem yang lain. Sub-sistem Labuhan bertugas mensuplai penyulang Nijang, KPL BGP, Utan, Exp Moyo, Exp Lape, VIP, dan penyulang Lenangguar.

Perkiraan biaya energi pada sistem kelistrikan Sumbawa diperkirakan sebesar Rp 2.372,01 /kWh. Perhitungan ini didasarkan pada harga dasar rata-rata HSD dan Biosolar sebesar Rp. 8.093/liter (semua belum termasuk biaya angkut) dan harga dasar rata-rata MFO Rp 6.436/liter. Untuk biaya angkut BBM, untuk setiap pembangkit adalah PLTD Labuhan Rp 52,91 /liter, PLTD BOAK MFO Rp 52,91/liter, PLTD Kanar Rp 58,20/liter, PLTD Alas Rp 166,67 /liter, PLTD Taliwang Rp 283,08 PLTD Empang Rp 288,37 /liter, PLTD Lunyuk Rp 369,71/liter , PLTD Medang Rp 523/liter , PLTD Lebin Rp 515/liter, PLTD Klawis Rp 540/liter, PLTD Lantung Rp 350/liter, PLTD Labuan Aji Rp 440/liter dan untuk PLTD Sebotok Rp 583/liter. Prakiraan biaya pokok produksi sistem kelistrikan Sumbawa disajikan dalam Tabel 3

Tabel 3 Prakiraan Biaya Pokok produksi

No.	Komponen Biaya	Satuan	Jumlah
1	Biaya Bahan Bakar	Rp x Juta	50,214.0
2	Biaya Sewa Mesin	Rp x Juta	7,199.2
4	Biaya Pelumas	Rp x Juta	162.2
Total Biaya		Rp x Juta	57,575.4
Produksi Energi		GWh	24.3
Biaya Energi		Rp / kWh	2,372.01

Sumber: Data sekunder PT PLN Sektor Tambora



Gambar 8 Rasio Komponen Biaya Pokok Produksi

Model 1 mensimulasikan sistem berbasis pembangkit termal sepenuhnya, mencerminkan fakta sistem saat ini, di mana suplai energi didominasi oleh PLTD besar seperti PLTD Labuhan, PLTD Taliwang, dan PLTD Empang. Sementara itu, Model 2 mengintegrasikan energi baru terbarukan (EBT) secara bertahap (5%, 10%, dan 15%) serta melibatkan pemanfaatan sistem baterai (Bat). Ini dirancang sebagai skenario masa depan yang relevan dengan kondisi topografi dan keterbatasan akses BBM di wilayah Sumbawa, terutama untuk PLTD kecil di daerah terpencil.

Sub-sistem Labuhan, yang memiliki beban tertinggi, sangat tergantung pada PLTD besar dan sewa, sementara wilayah-wilayah seperti Sebotok, Medang, dan Klawis disuplai oleh PLTD kecil dengan biaya BBM tinggi. Hal ini menjadikan sistem Sumbawa sangat sensitif terhadap harga bahan bakar dan biaya logistik, sehingga justru sistem inilah yang paling berpotensi memperoleh efisiensi signifikan dari integrasi EBT.

Berdasarkan data dari PT PLN Sektor Tambora, biaya pokok produksi (BPP) energi listrik di sistem Sumbawa diperkirakan sebesar Rp 2.372,01/kWh, yang secara signifikan lebih tinggi dari BPP nasional rata-rata, yaitu sekitar Rp 1.460/kWh (sumber: RUPTL 2021–2030). Tingginya nilai ini utamanya disebabkan oleh dominasi penggunaan BBM (HSD, MFO) dan tingginya ongkos angkut bahan bakar, yang dalam beberapa wilayah mencapai lebih dari Rp 500/liter, seperti di Medang dan Sebotok.

Dari Tabel 4.4 dan Gambar 4.3, dapat diidentifikasi bahwa lebih dari 70% dari total BPP berasal dari biaya bahan bakar dan logistiknya, sementara komponen operasi dan pemeliharaan hanya menyumbang sebagian kecil. Dengan demikian, strategi efisiensi biaya seharusnya diarahkan pada pengurangan penggunaan BBM, yang secara langsung berkaitan dengan strategi UC dan integrasi EBT.

Simulasi menunjukkan bahwa Model 1 (termal murni) menghasilkan total biaya harian sebesar Rp 755.986.557. Ketergantungan penuh terhadap PLTD menyebabkan tingginya beban operasional harian, terutama pada jam beban puncak (pukul 22.00).

Efisiensi ini bukan hanya bersumber dari pengurangan pembangkit termal yang beroperasi, tetapi juga dari:

1. Pemanfaatan baterai untuk menahan beban saat malam hari (saat Pv tidak tersedia), sehingga unit PLTD tidak perlu dinyalakan dalam jumlah besar.
2. EBT (terutama Pv dan Pw) aktif maksimal di siang hari, mengurangi kebutuhan pemakaian unit termal di jam menengah (10.00–14.00), saat beban cukup tinggi.
3. Peran baterai penting dalam pergeseran energi siang ke malam, memotong beban PLTD saat puncak malam hari.

Efisiensi ini secara teknis menunjukkan bahwa sistem hibrid mampu mengeliminasi konsumsi BBM hingga ± 1.000 liter/hari, setara dengan \pm Rp 140 juta/hari, jika mengacu pada rata-rata biaya bahan bakar per liter di sistem Sumbawa.

Hasil simulasi memiliki implikasi strategis tidak hanya terhadap efisiensi biaya tetapi juga pada:

1. Ketahanan Energi Lokal.
Daerah terpencil dengan PLTD kecil (seperti Sebotok dan Klawis) sangat cocok untuk digantikan oleh sistem EBT *off-grid* atau hibrid *mini-grid*, mengingat tingginya biaya distribusi BBM dan kerentanan terhadap keterlambatan logistik.
2. Dukungan terhadap Target Energi Nasional
Simulasi Model 2 menunjukkan bahwa penetrasi EBT tidak hanya layak secara teknis dan ekonomis, tetapi juga mendukung target RUPTL dan bauran energi nasional yang menargetkan >23% EBT pada 2025.
3. Pengurangan Emisi.
Mengingat setiap liter HSD menghasilkan $\pm 2,6$ kg CO₂, maka dengan pengurangan ± 1.000 liter BBM per hari, potensi reduksi emisi mencapai 2,6 ton CO₂/hari, atau ± 950 ton CO₂ per tahun.

PENUTUP

Hasil simulasi menggunakan algoritma enumerasi pada sistem *microgrid* di Kabupaten Sumbawa menunjukkan adanya efisiensi biaya operasional yang signifikan dengan penerapan energi baru terbarukan (EBT). Melalui Model 2 yang mengintegrasikan pembangkit angin, panel surya, dan baterai

ke dalam sistem eksisting berbasis diesel (Model 1), diperoleh penurunan biaya bahan bakar harian sebesar $\pm 6\%$ untuk penetrasi EBT 5%, $\pm 12\%$ untuk penetrasi 10%, dan mencapai $\pm 18\%$ pada skenario 15%. Jika dikonversi ke dalam nominal, efisiensi tersebut setara dengan penghematan sebesar \pm Rp 47,79 juta, \pm Rp 95,28 juta, dan \pm Rp 140,84 juta per hari secara berturut-turut dibandingkan dengan total biaya Model 1 sebesar Rp 755,99 juta per hari.

Efisiensi ini terutama diperoleh karena berkurangnya kebutuhan pengoperasian unit pembangkit diesel saat beban puncak, yang sebagian digantikan oleh suplai dari baterai dan sumber EBT yang lebih ekonomis. Hal ini tidak hanya berdampak pada pengurangan konsumsi bahan bakar fosil, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada BBM bersubsidi dan biaya logistik pengangkutan BBM ke wilayah terpencil. Temuan ini memberikan implikasi penting bagi PT PLN (Persero) dan pemangku kebijakan energi nasional, khususnya dalam konteks pencapaian target bauran EBT dan transisi menuju sistem kelistrikan yang lebih berkelanjutan. Integrasi EBT dalam skala terbatas terbukti memberikan manfaat ekonomi langsung tanpa mengorbankan keandalan sistem. Ke depan, penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menggunakan pendekatan optimasi yang lebih kompleks seperti *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) atau *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk memperoleh solusi *unit commitment* yang lebih efisien. Selain itu, integrasi parameter emisi karbon, biaya lingkungan, dan ketahanan sistem terhadap fluktuasi beban dan intermitensi EBT juga menjadi arah penting untuk kajian lanjutan. Model serupa juga layak diterapkan pada sistem kelistrikan daerah kepulauan lain di Indonesia yang memiliki karakteristik pembangkitan serupa.

REFERENSI

- Abdou, I., & Tkiouat, M. (2018). *Unit commitment* problem in electrical power system: A literature review. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8(3), 1357–1372. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1357-1372>
- Adytia Putra, R., & Nazir, R. (2023). Power Plant Performance Analysis on Variations of Generator Loading at Ombilin Coal Fired Steam Power Plant Unit 1 (2x100 MW). *Andalasian International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 3(2). <https://doi.org/10.25077/aijaset.v3i2.58>
- Deckmyn, C., Van de Vyver, J., Vandoorn, T. L., Meersman, B., Desmet, J., & Vandeveldel, L. (2017). Day-ahead *unit commitment* model for microgrids. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0222>
- Deng, D., Li, C., Zu, Y., Liu, L. Y. J., Zhang, J., & Wen, S. (2022). A Systematic Literature Review on Performance Evaluation of Power System From the Perspective of Sustainability. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.925332>
- Hasjanah, K. (2024). *Reaching the Target of 23% Renewable Energy Mix by 2025*. https://iesr.or.id/en/reaching-the-target-of-23-renewable-energy-mix-by-2025/?utm_source=chatgpt.com
- Khan, M. R., Haider, Z. M., Malik, F. H., Almasoudi, F. M., Alatawi, K. S. S., & Bhutta, M. S. (2024). A Comprehensive Review of Microgrid Energy Management Strategies Considering Electric Vehicles, Energy Storage Systems, and AI Techniques. In *Processes* (Vol. 12, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/pr12020270>
- Maharani, C., Supriyadi, I., Tumanggor, M., & Nugroho, B. (2024). MICROGRID EBT MEWUJUDKAN ENERGI BERKELANJUTAN DALAM AKSES LISTRIK MERATA DI INDONESIA. *MACHINERY JURNAL TEKNOLOGI TERAPAN*, 5(2), 2723–3359. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12738>
- Mirsaeidi, S., Devkota, S., Wang, X., Tzelepis, D., Abbas, G., Alshahir, A., & He, J. (2023). A Review on Optimization Objectives for Power System Operation Improvement Using FACTS Devices. In *Energies* (Vol. 16, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16010161>
- Mohammad Masih Sediqi, Masahiro Furukakoi, Mohammed E. Lotfy, Atsushi Yona, & Tomonobu Senjyu. (2017). An Optimization Approach for *Unit commitment* of a Power System Integrated with Renewable Energy Sources: A Case Study of Afghanistan. *Journal of Energy and Power Engineering*, 11(8). <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2017.08.004>
- Montero, L., Bello, A., & Reneses, J. (2022). A Review on the *Unit commitment* Problem: Approaches, Techniques, and Resolution Methods. *Energies*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/en15041296>

- Moretti, L., Martelli, E., & Manzolini, G. (2020). An efficient robust optimization model for the *unit commitment* and dispatch of multi-energy systems and microgrids. *Applied Energy*, 261, 113859. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113859>
- Nugroho Soelami, F., Leksono, E., Nashirul Haq, I., Pradipta, J., Handre Kertha Utama, P., Fieradiella Pahrevi, A., Rahmaniah, F., & Wasesa, M. (2020). Pemodelan Manajemen Energi Microgrid pada Sistem Bangunan Cerdas. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi*, 9(4), 414–422. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v9i4.488>
- Sapto Nisworo, Hasibuan, A., & Syafii, S. (2023). Optimization of Thermal Power Plant Operations Using Genetic Algorithms. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 50–55. <https://doi.org/10.25077/jnte.v12n2.1090.2023>
- Shafiullah, M., Refat, A. M., Haque, M. E., Chowdhury, D. M. H., Hossain, M. S., Alharbi, A. G., Alam, M. S., Ali, A., & Hossain, S. (2022). Review of Recent Developments in Microgrid Energy Management Strategies. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su142214794>
- Utama, F. F., Wibowo, R. S., & Putra, D. F. U. (2016). *Unit commitment* Mempertimbangkan Fungsi Biaya Tak Mulus dengan Metode Binary Particle Swarm Optimization. *Jurnal Teknik ITS*, 1(5), 295–298.
- Yafi, A. H., Bagaskara, A., Siswinugraha, A. P., Hapsari, A., Wijaya, F., Padhilah, F. A., Wismadi, F. S., Bintang, H. M., Surya, I. R. F., Adiatma, J. C., Mendrofa, M. J. S., Aji, P., Maswan, P., Wiranegara, R. Y., Sari, R. P., & Firdausi, S. N. (2023). *Indonesia Energy Transition Outlook 2024 IESR Institute for Essential Services Reform*. www.iesr.or.id