

PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM ENERGI MENGGUNAKAN *OPEN ENERGY MODELLING FRAMEWORK* (OEMOF)

*Adriano Islamov Restupradhana Widjaya¹, Ismoyo Haryanto², Muchammad²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: adrianoslmv@gmail.com

Abstrak

Transisi menuju sistem energi bersih dan berkelanjutan memerlukan *framework* yang mampu mengintegrasikan beragam sumber energi terbarukan sekaligus mengelola ketidakpastian fluktuasi cuaca dan beban permintaan. Dalam penelitian ini, OEMOF Solph sebuah *framework open-source* berbasis *Python* digunakan untuk memodelkan dan mengoptimasi sistem energi dengan pendekatan Mixed-Integer Linear Programming. Fokus penelitian adalah pemanfaatan sumber energi seperti PV, turbin angin, baterai, dan pembangkit gas untuk memenuhi kebutuhan energi harian secara optimal tanpa menciptakan kelebihan pasokan yang tidak terkelola, serta meminimalkan biaya operasional. Tujuan penelitian mencakup perancangan model sistem energi yang memasukkan parameter seperti kapasitas penyimpanan yang terpasang, efisiensi konversi, biaya variabel, dan profil permintaan atau penggunaan energi dengan resolusi waktu per jam, di samping evaluasi kontribusi masing-masing komponen dan efektivitas mekanisme penyimpanan serta pengaturan kelebihan pasokan (*excess handling*). Simulasi dimulai dengan impor data dari berkas CSV, penyusunan objek model pada OEMOF Solph, dan formulasi fungsi objektif untuk meminimalkan total biaya operasional, diiringi penerapan kendala keseimbangan energi, batas kapasitas, serta efisiensi konversi dan penyimpanan. Simulasi sepanjang satu tahun dijalankan menggunakan solver CBC dan GLPK. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi sumber terbarukan mampu mendominasi penyediaan energi operasional, sedangkan peran pembangkit gas menjadi sumber energi cadangan saat variasi beban tinggi. Sistem penyimpanan baterai terbukti efektif untuk meredam fluktuasi beban dan menekan potensi *overproduction*, sehingga model yang dikembangkan berhasil merumuskan skenario operasi yang andal dan hemat biaya.

Kata kunci: energi terbarukan; mixed-integer linear programming; oemof solph; penyimpanan energi; *python*

Abstract

Transitioning toward clean and sustainable energy systems requires a framework capable of integrating diverse renewable sources while managing uncertainties in weather fluctuations and demand; in this study, OEMOF Solph—an open-source, Python-based framework—is employed to model and optimize energy systems using a Mixed-Integer Linear Programming approach. The research focuses on leveraging photovoltaic panels, wind turbines, batteries, and gas power plants to meet daily energy needs optimally without generating unmanaged excess supply, all while minimizing operational costs. The study aims to design an energy system model that incorporates parameters such as installed storage capacity, conversion efficiency, variable costs, and hourly demand profiles, and to evaluate each component's contribution alongside the effectiveness of storage mechanisms and excess handling. The simulation workflow begins with importing CSV data, constructing model objects in OEMOF Solph, and formulating an objective function to minimize total operational costs under energy balance, capacity limit, and conversion and storage efficiency constraints. A one-year simulation is conducted using the CBC and GLPK solvers. Results demonstrate that renewable sources can dominate the operational energy mix, with gas power plants serving as a reliable backup during peak demand variations. Battery storage proves effective in smoothing demand fluctuations and suppressing potential overproduction, enabling the model to devise reliable, cost-efficient operational scenarios.

Keywords: energy storage; mixed-integer linear programming; oemof solph; python; renewable energy

1. Pendahuluan

Seiring meningkatnya permintaan energi global, semakin mendesak untuk beralih ke sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Penurunan cadangan bahan bakar fosil, perubahan iklim, dan dorongan untuk energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan biomassa telah merangsang pengembangan sistem energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Masalah utama dalam transisi energi ini adalah kompleksitas perencanaan dan pengelolaan sistem energi yang mencakup berbagai sektor dengan dinamika yang berbeda-beda.

OEMOF merupakan singkatan dari *Open Energy Modelling Framework*, sebuah kerangka kerja *open-source* yang dikembangkan untuk mendukung pemodelan sistem energi. OEMOF ditulis dalam bahasa pemrograman *Python*, yang dikenal karena fleksibilitas dan dukungan *library* yang luas.

Dengan kemampuan OEMOF yang mampu mengintegrasikan berbagai sumber energi, peneliti dapat mengevaluasi skenario transisi energi berdasarkan ketersediaan energi terbarukan, dampak lingkungan, dan efisiensi ekonomi.

OEMOF menggunakan representasi berbasis grafik di mana *node* mewakili komponen sistem energi seperti pembangkit dan *edge* mewakili aliran energi di antara komponen-komponen ini. OEMOF dapat memodelkan sistem energi multi-sektor, seperti listrik, panas, dan transportasi, dan mendukung analisis *cross-sectoral* untuk memahami interaksi antar sektor.

OEMOF Solph (*Simple Optimization Model for Python*) merupakan modul inti OEMOF yang memungkinkan pembuatan model optimasi linier *mixed-integer*. Modul ini menyediakan berbagai kelas yang merepresentasikan komponen sistem energi dunia nyata, seperti pembangkit listrik dan penyimpanan energi [1].

OEMOF Tabular adalah modul dalam kerangka kerja OEMOF (*Open Energy Modelling Framework*) yang menyederhanakan proses pembuatan dan modifikasi model sistem energi. Modul ini memungkinkan pengguna untuk mendefinisikan input model dalam format tabular (.csv), yang lebih mudah dipahami dan dikelola dibandingkan dengan kode pemrograman. Contoh penggunaan *oemof-tabular* dalam sumber energi adalah untuk membangun model sistem energi Jerman dengan resolusi per jam (OSeM-DE). Model ini digunakan untuk menganalisis berbagai skenario transisi energi, seperti integrasi energi terbarukan dan elektrifikasi sektor transportasi [2].

Demandlib adalah *library* dalam sistem program OEMOF yang digunakan untuk membuat profil beban listrik dan panas dari profil beban permintaan yang ada. Profil beban ini dapat dibuat untuk berbagai sektor, seperti rumah tangga pribadi atau produksi industri. [3].

OEMOF Moea adalah sebuah model *bottom-up* jangka pendek inovatif yang dibangun berdasarkan kerangka kerja OEMOF. Model ini menggabungkan modul OEMOF Solph untuk menjalankan *dispatch* ekonomi/operasional atau *unit commitment* sebagai *linear program* (LP) atau *mixed-integer linear program* (MILP) dengan algoritma evolusioner multi-objektif (*Multi-Objective Evolutionary Algorithm* - MOEA) [1] [4].

Feedinlib merupakan *library* yang digunakan untuk menghitung data output untuk pembangkit listrik tenaga angin dan tenaga surya. *Feedinlib* menyediakan parameter-parameter untuk pembangkit listrik tenaga angin dan tenaga surya dan juga menyediakan dataset cuaca untuk jam angin dan matahari sebagai dasar dari perhitungan [5].

Linear Programming (LP) adalah subdisiplin dari optimasi matematika, yang merupakan bagian dari riset operasi (*operation research*). Riset operasi sendiri adalah disiplin ilmu yang berkaitan dengan penerapan berbagai metode dari matematika, statistika, probabilitas, dan teori permainan untuk menyelesaikan masalah pengambilan keputusan melalui metodologi penelitian [3] [6].

Mixed-Integer Linear Programming (MILP) merupakan perluasan dari *Linear Programming* (LP). Perbedaan utama antara keduanya terletak pada penambahan Batasan pada MILP dimana beberapa variabel harus berupa bilangan bulat [3] [7].

Python adalah bahasa pemrograman yang diciptakan oleh Guido van Rossum pada tahun 1991. *Python* bersifat *open-source* yang memiliki komunitas besar yang terus berkembang hingga kini, sehingga banyak dukungan dokumentasi serta *library* yang tersedia. *Python* dikenal dengan bahasanya yang mudah dan pemakaiannya mudah digunakan [8].

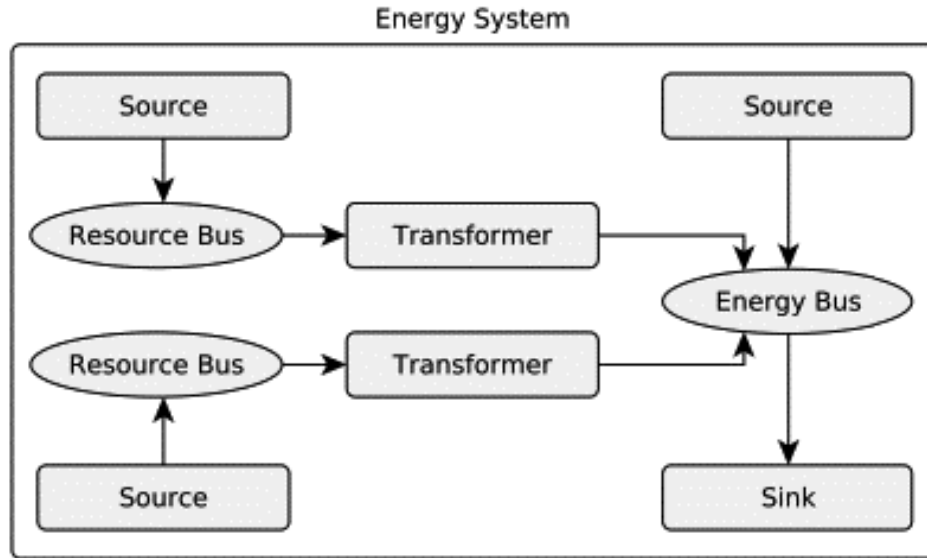
Photovoltaic (PV) merupakan sistem konversi energi yang memanfaatkan efek *photovoltaic* pada material semikonduktor untuk mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik. Konversi energi yang terjadi bersifat langsung tanpa komponen mekanis, yang menghasilkan sistem yang minim emisi. Kinerja sistem PV sangat bergantung pada intensitas sinar matahari serta suhu sekitar lingkungan [9].

Turbin angin merupakan teknologi konversi energi yang mengubah tenaga kinetik angin menjadi energi listrik melalui mekanisme rotasi baling-baling dan konversi mekanik melalui generator. Prinsip operasionalnya melibatkan transformasi energi kinetik angin menjadi energi mekanik, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik dengan efisiensi yang bergantung pada desain aerodinamika dan kondisi lingkungan.

Baterai merupakan komponen penting dalam sistem energi karena berperan menyimpan energi yang dihasilkan saat pasokan berlebih dan mendistribusikannya kembali saat terjadi kekurangan. Proses penyimpanan ini memanfaatkan reaksi kimia reversibel, yang memungkinkan konversi energi listrik ke dalam bentuk energi potensial kimia dan sebaliknya.

2. **Bahan dan Metode Penelitian**
 2.1. **Sistem Energi dan Optimasi**

Sistem energi memiliki konsep yang mengacu pada interaksi antara sumber energi, teknologi, dan infrastruktur untuk memenuhi kebutuhan energi.



Gambar 1 Skema Sistem Energi [10]

Sistem energi mencakup sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan tenaga air, serta sumber energi tak terbarukan seperti batu bara, gas alam, dan energi nuklir. Representasi skema sistem energi dalam OEMOF direpresentasikan pada Gambar 1 yang mana ditunjukkan seperti graf bipartit yang memisahkan bus (penampung energi) dan komponen (sumber, beban, atau proses konversi energi).

Secara konseptual, bus menjadi tempat berkumpulnya satu jenis energi. Sementara itu, komponen dapat diklasifikasikan menjadi:

1. *Source* berupa pembangkit atau sumber energi (PV, Wind Turbine)
2. *Sink* merupakan beban atau permintaan energi (electricity demand).
3. *Transformer* adalah komponen yang mengubah satu jenis energi ke jenis lain (gas - listrik).

Setiap aliran energi dalam model direpresentasikan oleh *edge* yang menghubungkan bus dan komponen. Sebagai contoh, turbin angin (*wind turbine*) dikategorikan sebagai *Source* karena menghasilkan listrik, sehingga mengalirkan energi ke bus listrik. Di sisi lain, beban (*demand*) atau permintaan energi adalah *Sink*, yang menerima pasokan listrik dari bus (aliran keluar bus menuju beban).

2.2. **Parameter dan Skenario Simulasi**

Parameter-parameter utama yang digunakan untuk memodelkan sistem energi diambil langsung dari kode yang telah dikembangkan menggunakan framework OEMOF Solph. Parameter-parameter tersebut mencakup nilai kapasitas nominal, efisiensi konversi, biaya operasional, dan data permintaan energi yang diimpor dari file yang berisi data permintaan dan produksi energi dari sistem energi yang digunakan.

The image shows a screenshot of a code editor with a dark theme. The code is written in Python and includes various imports, function definitions, and data processing logic. Key elements include:

- Imports for logging, pandas, and numpy.
- Function definitions for data processing and visualization.
- Comments in Indonesian explaining the code's purpose and data sources.

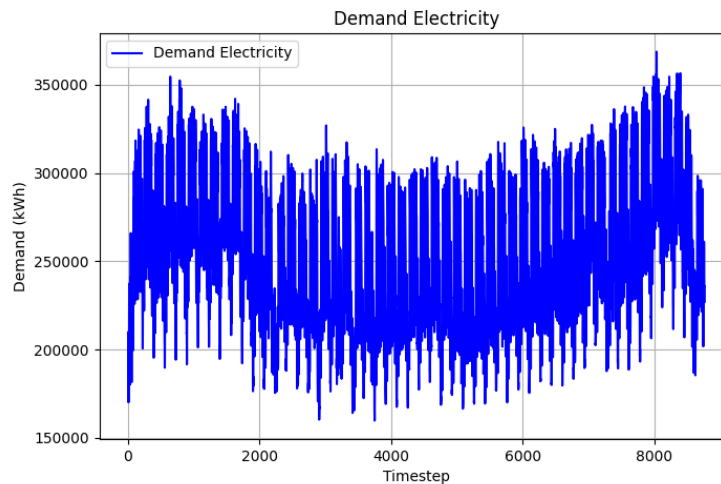
Gambar 2 Source Code Simulasi Sistem Energi OEMOF

Proses simulasi dimulai dengan pengambilan data parameter dan constraint dari file CSV yang diperoleh dari website OEMOF. Data ini mencakup kebutuhan energi dan produksi energi dari sumber energi terbarukan dengan resolusi per-jam selama satu tahun (sekitar 8760 timestep). Data tersebut diintegrasikan ke dalam framework OEMOF Solph, yang kemudian dikonversi menjadi model optimasi berbasis Mixed-Integer Linear Programming (MILP) dengan mendefinisikan fungsi objektif untuk meminimalkan total biaya operasional serta menetapkan batasan fisik dan operasional pada masing-masing komponen sistem.

2.3. Grafik Data

Berikut merupakan rangkaian data untuk menjalankan model optimasi pada OEMOF Solph. Data ini mencakup kebutuhan/permintaan listrik (*demand*), kapasitas sumber energi, biaya operasi, serta parameter sumber energi lainnya.

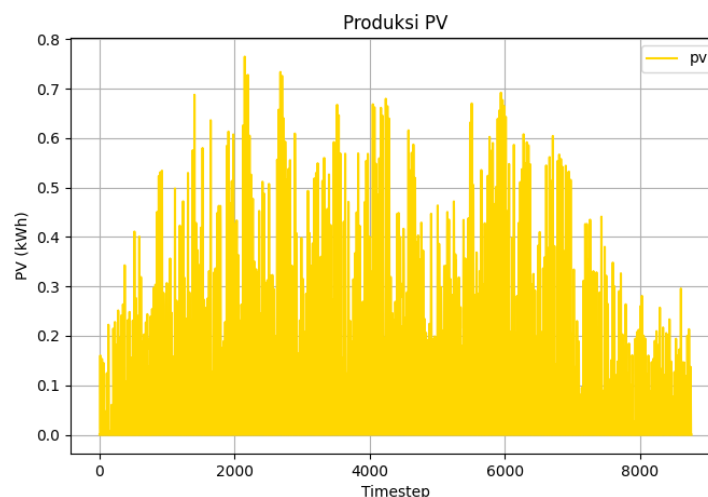
2.3.1 Grafik Demand Electricity (Permintaan/Kebutuhan Listrik)



Gambar 3 Grafik *Demand Electricity* (Permintaan/Kebutuhan Listrik)

Grafik diatas mengilustrasikan perubahan permintaan listrik (dalam satuan kWh) secara berkala sepanjang periode waktu. Bentuk kurva yang tampak mengalami fluktuasi signifikan, menandakan bahwa terdapat adanya tren harian ataupun musiman yang memengaruhi kebutuhan energi.

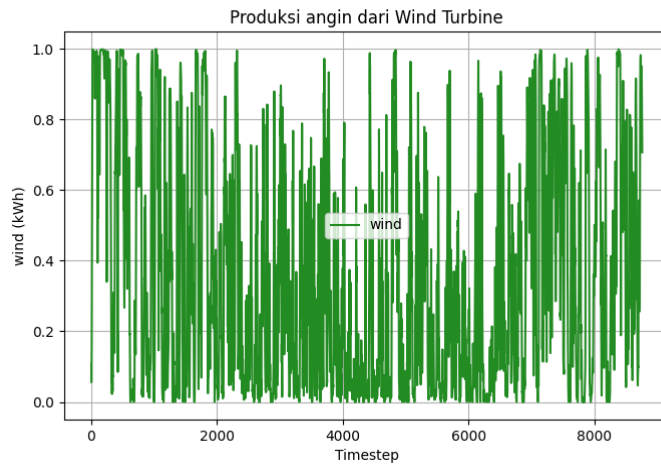
2.3.2 Grafik Produksi *Photovoltaics* (PV)



Gambar 4 Grafik Produksi PV

Grafik pada Gambar 4 di atas menunjukkan produksi energi listrik yang dihasilkan oleh *Photovoltaics* (PV), dengan pola yang berfluktuasi mengikuti perubahan intensitas radiasi matahari. Fenomena ini terkait erat dengan siklus harian ketika cahaya matahari berada pada puncak intensitasnya di tengah hari, produksi listrik akan meningkat signifikan, sedangkan menjelang pagi atau sore hari, output PV berangsur turun.

2.3.3 Grafik Produksi Angin dari *Wind Turbine*



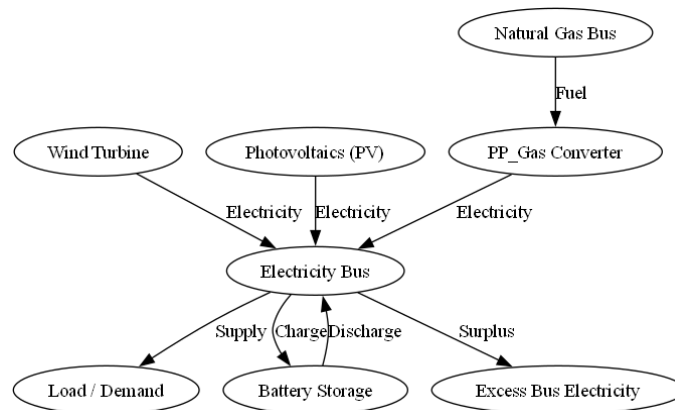
Gambar 5 Grafik Produksi Angin

Grafik di atas menampilkan besaran energi listrik yang dihasilkan oleh *Wind Turbine* (wind turbine). Terlihat jelas bahwa pola output dari *Wind Turbine* ini sangat berfluktuasi dan cenderung acak, mencerminkan karakteristik alamiah sumber energi angin yang bergantung pada kecepatan angin di setiap waktu. Semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar pula daya yang dihasilkan,

2.4. Alur Penelitian

Dalam proses optimasi ini, *Solver* yang digunakan adalah *Solver CBC (Coin-or Branch and Cut)* yang bekerja dengan metode *branch and cut* yang sangat efektif untuk menangani masalah optimasi yang mengandung variabel *integer*. Dalam proses ini, CBC pertama-tama memecah masalah besar menjadi sub-masalah yang lebih kecil melalui teknik *branching*, yaitu dengan memisahkan berbagai kemungkinan nilai untuk variabel-variabel *integer* yang ada dalam model. Setelah pembagian tersebut, *solver* menerapkan metode *cutting planes* dengan menambahkan batasan tambahan untuk menghilangkan solusi-solusi yang tidak layak atau tidak optimal. Metode *cutting* ini membantu memperkecil ruang pencarian solusi secara signifikan dan mempercepat proses iterasi. CBC terus melakukan proses *branching* dan *cutting* secara iteratif hingga mencapai konvergensi, yaitu ketika tidak ada perbaikan lebih lanjut yang dapat dicapai pada fungsi objektif. Hasil akhirnya adalah solusi optimal yang menunjukkan nilai aliran energi pada setiap timesteps yang memenuhi seluruh constraint dan meminimalkan total biaya operasional sistem

3. Hasil dan Pembahasan



Gambar 6 Diagram Sistem Energi

Diagram di atas menggambarkan aliran energi dalam sistem yang mengintegrasikan tiga sumber utama, yaitu *Wind Turbine*, PV, dan *Natural Gas Bus*. *Wind Turbine* dan PV langsung menyalurkan listrik yang dihasilkan ke *Electricity Bus*. Sementara itu, *Natural Gas Bus* menyuplai bahan bakar ke *PP_Gas Converter* yang kemudian mengubah gas menjadi listrik dan mengirimkannya ke *Electricity Bus*.

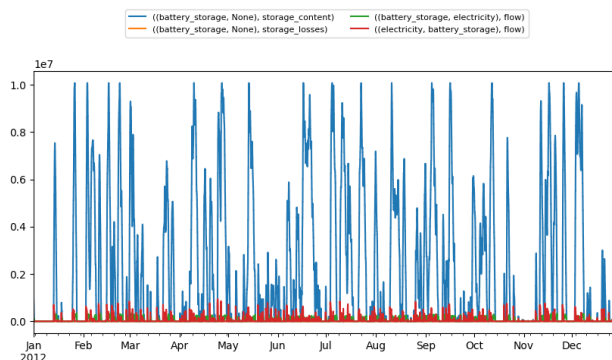
Dari *Electricity Bus*, energi dapat disalurkan untuk memenuhi beban (*Load/Demand*) secara langsung. Jika pasokan listrik melebihi kebutuhan beban, kelebihan tersebut dapat disimpan di *Battery Storage* untuk digunakan kemudian saat produksi energi terbarukan menurun atau beban meningkat. Proses ini terlihat dari adanya aliran “*Charge/Discharge*” yang bersifat dua arah antara *Electricity Bus* dan *Battery Storage*. Jika setelah penyimpanan masih terdapat surplus energi, maka kelebihan tersebut dialirkan ke *Excess Bus Electricity* agar tidak mengganggu kestabilan sistem.

Sistem ini dirancang untuk mengelola aliran energi dari berbagai sumber secara efisien, untuk memastikan pasokan energi yang stabil. Sistem energi yang dimodelkan terdiri dari:

1. *Electricity Bus*
2. *Natural Gas*
3. *Battery Storage*
4. Sumber Energi Utama (Turbin Angin, *Photovoltaics*, Pembangkit Gas)
5. *Excess Bus Electricity*

3.1. Grafik Hasil

3.1.1 Grafik Kondisi Baterai (*Battery Storage*)



Gambar 7 Grafik Kondisi Penyimpanan Baterai

Grafik pada Gambar 7 ini menggambarkan kondisi penyimpanan energi pada sistem baterai dengan beberapa indikator. Rentang penyimpanan dibatasi oleh kapasitas baterai yang telah ditetapkan di dalam model, yaitu:

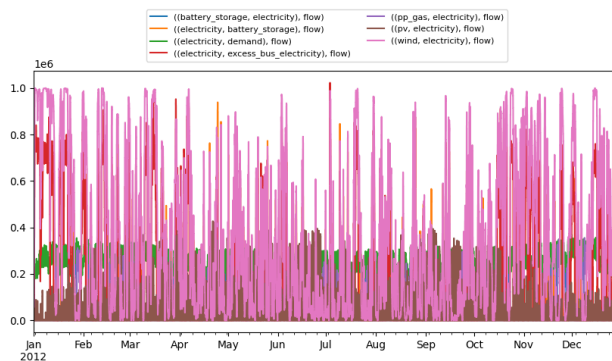
$$SoC_{max} = 10.077.977 \text{ kWh} \quad (1)$$

Selain itu, lajur pengisian dan pengosongan baterai dibatasi oleh parameter:

$$nominal_value_battery = \frac{SoC_{max}}{6} \quad (2)$$

Yang berarti bahwa dalam satu jam, hanya sebagian dari kapasitas total baterai yang dapat diisi atau dikuras, sehingga memberikan batasan operasional untuk menjaga kestabilan dan efisiensi biaya operasi sistem energi.

3.1.2 Grafik Aliran Listrik (*Electricity Bus*)



Gambar 8 Grafik Aliran Listrik (*Electricity Bus*)

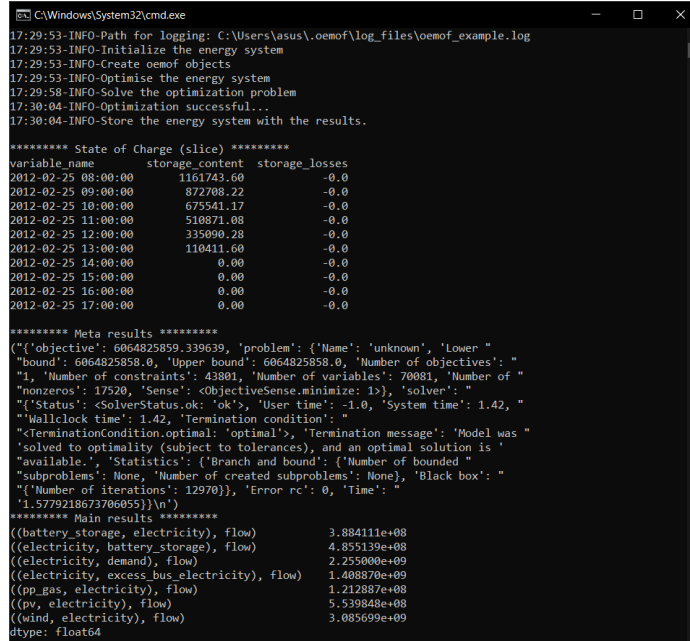
Grafik diatas berfokus pada gambaran aliran energi di dalam bus listrik, yang menjadi komponen penting dalam distribusi energi pada sistem. Grafik ini menunjukkan aliran listrik dari berbagai sumber, seperti pembangkit listrik tenaga gas, panel surya, turbin angin, dan baterai.

Aliran listrik terbesar berasal dari pembangkit listrik tenaga gas (pp_gas) berwarna (merah muda). Aliran listrik dari pembangkit listrik tenaga gas mengalami fluktuasi yang cukup besar sepanjang tahun. *Excess_bus* yang ditampilkan dalam warna coklat mewakili kelebihan listrik dalam jumlah signifikan di beberapa periode.

Warna hijau, merah, dan oren menunjukkan aliran energi dari sumber angin dan PV (*photovoltaic*) yang muncul secara berkala, meskipun lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga gas

Terlihat bahwa permintaan listrik paling tinggi pada bulan Juni dan Juli, dan cenderung menurun pada bulan Desember.

3.1.3 Output Konsol



```

C:\Windows\System32\cmd.exe
17:29:53-INFO-Path for logging: C:\Users\asus\.oemof\log_files\oemof_example.log
17:29:53-INFO-Initialize the energy system
17:29:53-INFO-Create oemof objects
17:29:53-INFO-Optimize the energy system
17:29:58-INFO-Solve the optimization problem
17:30:04-INFO-Optimization successful...
17:30:04-INFO-Store the energy system with the results.

***** State of Charge (slice) *****
variable_name      storage_content  storage_losses
2012-02-25 08:00:00    1161743.60      -0.0
2012-02-25 09:00:00     872708.22      -0.0
2012-02-25 10:00:00    675541.17      -0.0
2012-02-25 11:00:00    510871.08      -0.0
2012-02-25 12:00:00    335090.28      -0.0
2012-02-25 13:00:00    110411.60      -0.0
2012-02-25 14:00:00         0.00         -0.0
2012-02-25 15:00:00         0.00         -0.0
2012-02-25 16:00:00         0.00         -0.0
2012-02-25 17:00:00         0.00         -0.0

***** Meta results *****
({'objective': 6064825859.339639, 'problem': {'Name': 'unknown', 'Lower '
'bound': 6064825858.0, 'Upper bound': 6064825858.0, 'Number of objectives': '
'1', 'Number of constraints': 43801, 'Number of variables': 70081, 'Number of '
'nonzeros': 17520, 'Sense': <ObjectiveSense.minimize: 1>}, 'solver': '
'{'Status': <SolverStatus.ok: 'ok'>, 'User time': -1.0, 'System time': 1.42, '
'Wallclock time': 1.42, 'Termination condition': '
'<TerminationCondition.optimal: 'optimal'>, 'Termination message': 'Model was '
'solved to optimality (subject to tolerances), and an optimal solution is '
'available.', 'Statistics': {'Branch and bound': {'Number of bounded '
'subproblems': None, 'Number of created subproblems': None}, 'Black box': '
'{'Number of iterations': 12970}}, 'Error rc': 0, 'Time': '
'1.5779218673786055}}\n')
***** Main results *****
((battery_storage, electricity), flow)      3.88411e+08
((electricity, battery_storage), flow)      4.853139e+08
((electricity, demand), flow)              2.255000e+09
((electricity, excess_bus_electricity), flow) 1.408870e+09
((pp_gas, electricity), flow)              1.212887e+08
((pv, electricity), flow)                  5.539848e+08
((wind, electricity), flow)                3.085699e+09
dtype: float64
    
```

Gambar 9 Output Konsol

Output ini terbagi ke beberapa bagian, yaitu interpretasi terkait *State of Charge* (SoC) pada baterai, informasi meta mengenai solver yang digunakan dalam proses optimasi, dll.

Tabel 1 Perkembangan *State of Charge* (SoC)

variable name	storage content (kWh)	storage losses
25/02/2012 08:00	1161743.60	-0.0
25/02/2012 09:00	872708.22	-0.0
25/02/2012 10:00	675541.17	-0.0
25/02/2012 11:00	510871.08	-0.0
25/02/2012 12:00	335090.28	-0.0
25/02/2012 13:00	110411.60	-0.0
25/02/2012 14:00	0.00	-0.0
25/02/2012 15:00	0.00	-0.0
25/02/2012 16:00	0.00	-0.0
25/02/2012 17:00	0.00	-0.0

Pada output yang diperoleh dari simulasi, khususnya pada rentang waktu dari 08:00 hingga 13:00 tanggal 25 Februari 2012, terlihat adanya penurunan nilai *storage_content* pada baterai dari sekitar 1.161.743,60 kWh menjadi 110.411,60 kWh. Penurunan ini secara jelas mengindikasikan bahwa baterai mengalami proses pengosongan (*discharge*) dalam periode tersebut. Penurunan ini diperkirakan terjadi karena beban sistem tidak sepenuhnya terpenuhi oleh pasokan energi yang berasal dari *Wind Turbine* dan *Photovoltaics*, sehingga baterai digunakan untuk menutupi kekurangan tersebut.

3.1.4 Ringkasan Hasil Simulasi

Tabel 2 Ringkasan Hasil Simulasi

Parameter	Nilai
Objective	6064825859.339639
Lower Bound	6064825858.0
Upper Bound	6064825858.0
Number of Objectives	1
Number of Constraints	43801
Number of Variables	70081
Number of Nonzeros	17520

Berdasarkan *meta results* dari OEMOF Solph, terdapat sejumlah parameter penting yang mencerminkan karakteristik dan kinerja model. *Objective* sebesar 6,064,825,859.34 menunjukkan total biaya yang berhasil diminimalkan. Selanjutnya, terdapat kesamaan antara *Lower Bound* dan *Upper Bound* (6,064,825,858.0) menandakan bahwa model telah mencapai kondisi optimal. Model ini hanya memiliki satu tujuan optimasi, sebagaimana terlihat dari *Number of Objectives* yang bernilai 1. Sementara itu, *Number of Constraints* sebesar 43.801 dan *Number of Variables* sebanyak 70.081 mencerminkan tingkat kompleksitas sistem yang dioptimasi, *Number of Nonzeros* sebesar 17.520 menegaskan seberapa padat persamaan atau pertidaksamaan yang membentuk model tersebut

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis model sistem energi menggunakan OEMOF Solph, dapat ditarik beberapa kesimpulan berikut:

1. Fungsi objektif OEMOF Solph berhasil meminimalkan total biaya operasional sistem hingga sekitar 6,064 miliar dengan error kurang dari 0,05% dibanding perhitungan manual.
2. Integrasi PV dan turbin angin menurunkan biaya operasional karena biaya variabelnya hampir nol, namun memerlukan dukungan baterai dan pembangkit gas untuk menjaga pasokan saat produksi menurun.
3. Turbin angin dan PV menjadi penyumbang utama energi, sementara baterai menyeimbangkan fluktuasi beban, dan pembangkit gas hanya digunakan saat terjadi kekurangan pasokan.
4. Komponen excess menampung 1,41 miliar kWh kelebihan produksi, mencegah overproduction dan menjaga stabilitas sistem.

5. Daftar Pustaka

- [1] Prina MG, Casalicchio V, Kaldemeyer C, Manzolini G, Moser D, Wanitschke A, Sparber W. Multi-objective investment optimization for energy system models in high temporal and spatial resolution. *Appl Energy*. 2020 Apr 15;264:114728. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114728.
- [2] Maruf MNI. Open model-based analysis of a 100% renewable and sector-coupled energy system – The case of Germany in 2050. *Appl Energy*. 2021 Apr 15;288:116618. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116618.
- [3] Nagel J. Optimization of energy supply systems: Modelling, programming and analysis. Cham: Springer International Publishing; 2019. (Lecture Notes in Energy; vol. 69). p. 9.
- [4] Prina A, Allergut V, Gazzani M. Implementing a highly adaptable method for the multi-objective optimisation of energy systems [Internet]. Munich (Germany): Munich Personal RePEc Archive; 2020 Nov 30. Report No.: 115504.
- [5] Majidi H, et al. Overview of energy modeling requirements and tools for future smart energy systems. *Renew Sust Energy Rev*. 2025;212:115367.
- [6] Bentzen E. An introduction to Linear Programming with applications. 2022.
- [7] Clautiaux F, Ljubić I. Last fifty years of integer linear programming: a focus on recent practical advances. *Eur J Oper Res*. 2024 Nov;324(3):707–731.
- [8] Virtanen P, et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat Methods*. 2020;17(3):261–272.
- [9] Hassan SM, Omer MMBE, Mofdal MEE. Determining the Efficiency of Solar Cells at Different Temperatures. *J Power Energy Eng*. 2025;13(4):23–32.
- [10] Hilpert S, Kaldemeyer C, Krien U, Günther S, Wingenbach C, Plessmann G. The Open Energy Modelling Framework (oemof) – A new approach to facilitate open science in energy system modelling. *Energy Strateg Rev*. 2018;22:16–25.