

Desain Pola Operasi Sistem Hibrida Sumber Energi Terbarukan pada Living Laboratory REIDI

^{1*} Kevinda Anugrah Nurcahya, ² Dedet Candra Riawan, ³ Mochamad Ashari

¹ Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya

² Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya

³ Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya

¹kevindanurcahya@gmail.com, ²dedet@its.ac.id, ³ashari@its.ac.id

Article Info

Keyword:

Energi Terbarukan
Pembangkit Listrik Hibrida
REIDI
Optimasi Biaya Operasional
PYOMO

Copyright © 2025 -SNTE
All rights reserved

ABSTRACT

Abstrak— Penggunaan energi terbarukan dalam pembangkit listrik telah menjadi prioritas strategis global untuk rencana energi jangka menengah dan panjang, didorong oleh meningkatnya kebutuhan energi dan kesadaran dampak lingkungan dari bahan bakar fosil. Tantangan utama berupa intermittensi dan ketergantungan kondisi cuaca diatasi melalui implementasi *Hybrid Renewable Energy System* (HRES) yang mengintegrasikan berbagai sumber energi terbarukan dengan teknologi penyimpanan energi. Penelitian ini bertujuan merancang pola operasi optimal untuk meminimalkan biaya pengoperasian sistem hibrida pada *Renewable Energy Integration Demonstrator of Indonesia* (REIDI) menggunakan optimasi PYOMO. Sistem terintegrasi meliputi pembangkit listrik tenaga surya, sistem penyimpanan baterai (LFP dan VRLA), sistem penyimpanan hidrogen (HESS), pembangkit biomassa, diesel generator, dan koneksi jaringan PLN. REIDI difungsikan sebagai pembangkit tenaga listrik yang menyuplai kebutuhan beban di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) sekaligus sebagai laboratorium untuk mensimulasikan kondisi-kondisi kelistrikan hibrida baik dalam mode *on-grid* maupun *off-grid*. Untuk fungsi sebagai pembangkit, energi yang dihasilkan REIDI sebesar 3.925,69 kWh per hari dengan biaya operasional Rp 1.220.109,61 dan keuntungan Rp 4.334.738,58 tanpa memperhitungkan investasi. Jika memperhitungkan investasi, keuntungan turun menjadi Rp 1.139.261,85. Untuk pemanfaatan sebagai laboratorium dengan profil beban 4.786 kWh per hari, optimasi dilakukan pada empat skenario yaitu *on-grid* normal operasi, *on-grid* dengan pembatasan jaringan, *off-grid* baterai *grid forming*, dan *off-grid* diesel *grid forming*. Hasil penelitian menunjukkan skenario *on-grid* normal operasi mencapai efisiensi ekonomi tertinggi dengan biaya operasional Rp 6.905.072,15. Sistem PV menunjukkan konsistensi pemanfaatan 100% di seluruh skenario, sementara biomassa terbukti ekonomis sebagai *baseload* dengan biaya Rp 1.065,39 per kWh. Konfigurasi *off-grid* mengalami peningkatan biaya signifikan hampir satu setengah kali, mengonfirmasi *trade-off* fundamental antara efisiensi ekonomi dan kemandirian energi.

Corresponding Author:

Kevinda Anugrah Nurcahya,
Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya,
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111.
Email: kevindanurcahya@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Penggunaan energi terbarukan secara optimal untuk pembangkit listrik menjadi isu krusial dalam perencanaan energi jangka menengah dan panjang[1]. Seiring meningkatnya kebutuhan energi dan kesadaran akan dampak lingkungan, perhatian global bergeser ke sumber energi yang bersih dan berkelanjutan[2]. Meski potensinya besar, energi terbarukan menghadapi tantangan intermittensi dan ketergantungan cuaca, sehingga pembangkit listrik hibrida muncul sebagai solusi inovatif terhadap masalah ini.

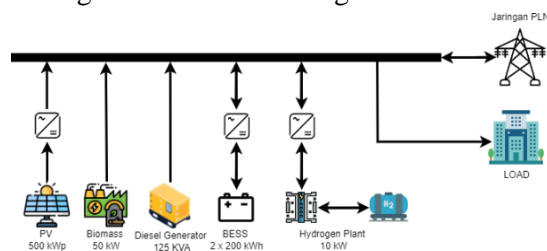
Hybrid Renewable Energy System (HRES) menggabungkan berbagai sumber energi terbarukan seperti surya, angin, dan biomassa dengan teknologi penyimpanan energi serta sumber daya tak terbarukan. Kombinasi ini mengatasi tantangan efektivitas dan intermittensi, sehingga pasokan listrik menjadi lebih stabil dan andal[3]. Di Indonesia, potensi besar EBT seperti matahari, angin, air, dan biomassa menjadikan sistem hibrida sangat relevan. Salah satu inisiatif terdepan adalah *Renewable Energy Integration Demonstrator of Indonesia* (REIDI), yang bertujuan mengintegrasikan teknologi energi terbarukan untuk menciptakan sistem yang andal dan berkelanjutan. Banyaknya sumber energi memerlukan strategi operasional baru guna menjaga stabilitas, efisiensi biaya, dan keandalan sistem[4].

Penelitian ini berfokus pada perancangan pola operasi optimal untuk sistem energi hibrida terbarukan di REIDI, yang mengintegrasikan pembangkit listrik tenaga surya, penyimpanan baterai, penyimpanan hidrogen, pembangkit biomassa, dan diesel, yang seluruhnya terhubung ke jaringan PLN. Penelitian ini dibagi menjadi dua fokus utama. Pertama, dalam skenario REIDI sebagai pembangkit energi, pola operasi dioptimalkan untuk memaksimalkan ekspor energi bersih ke jaringan, di mana analisisnya mencakup kondisi tanpa dan dengan mempertimbangkan biaya investasi. Kedua, dalam skenario *Living Laboratory*, sistem dianalisis pada kondisi *on-grid* (saat terhubung normal maupun saat ada pembatasan daya dari PLN) dan kondisi *off-grid* (beroperasi mandiri dengan pendekatan *grid forming* berbasis baterai dan diesel). Proses optimasi ini dilakukan menggunakan platform PYOMO dengan memperhitungkan batasan-batasan krusial seperti keseimbangan daya, status baterai, dan batasan operasional komponen lainnya, untuk menghasilkan profil daya optimal per jam bagi tiap komponen sesuai skenario yang ditetapkan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Dasar Teori

1) *Renewable Energy Integration Demonstrator of Indonesia (REIDI)*: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) membangun proyek *Renewable Energy Integration Demonstrator of Indonesia (REIDI)* dalam program INSPIRASI bersama NTU Singapura dan beberapa universitas di Indonesia. REIDI merupakan laboratorium hidup energi terbarukan terbesar di Indonesia, berdiri di lahan 1,5 hektare di kampus ITS. Sistem ini mencakup lima sistem PV (2×100 kWp *agrovoltaic*, 150 kWp *ground-mounted*, 100 kWp *floating*, dan 50 kWp *rooftop*), pembangkit biomassa 50 kW, dan *Diesel Engine Generator (DEG)* 100 kW. Untuk penyimpanan, digunakan dua sistem BESS (LFP dan VRLA) masing-masing 200 kWh, serta HESS 10 kW untuk menyimpan energi dalam bentuk hidrogen.



Gbr. 1 Skema Sistem REIDI

2) *Pembangkit Listrik Tenaga Surya*: Sistem pembangkit listrik tenaga surya menggunakan *photovoltaic (PV)*, yang mengubah tenaga surya menjadi listrik melalui sel surya dengan prinsip kerja berdasarkan karakteristik material semikonduktor. Menurut titik daya maksimum (*maximum power point*),

daya keluaran PV dapat dihitung menggunakan persamaan (1), dengan parameter yang diambil dari datasheet PV berdasarkan *standard test condition* (STC) dan *nominal operating cell temperature* (NOCT)[5].

$$P_{PV} = [P_{PV,STC} \times \frac{G_T}{1000} \times [1 - \gamma \times (T_j - 25)]] \times N_{PV} \quad (1)$$

Di mana besarnya T_j sesuai dengan persamaan

$$T_j = T_{amb} + \frac{G_T}{800} \times (NOCT - 20) \quad (2)$$

Dalam mengevaluasi keekonomian sistem PV, digunakan parameter *Levelized Cost of Energy* (LCOE), yaitu biaya rata-rata produksi listrik per kWh sepanjang umur operasional sistem. Rumus LCOE disajikan dalam persamaan (3).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t \pm M_t \pm F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

3) *Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa*: Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dimanfaatkan untuk menghasilkan panas dan listrik melalui proses termokimia dan biokimia seperti pembakaran, gasifikasi, pirolisis, serta pencernaan anaerob/aerob. Proses utama yang digunakan adalah pembakaran, yang menghasilkan uap untuk keperluan industri atau pembangkitan listrik. Daya dari generator biomassa dapat dihitung dengan rumus berikut [6].

$$P_{BMG} = \frac{Q_{BM} \times \eta_{BMG} \times CV_{BM} \times 1000}{DOH_{BMG} \times 365 \times 860} \quad (4)$$

Jumlah biomassa yang digunakan (Q_{BM}) menentukan biaya energi pada sistem pembangkit biomassa dan biaya energinya didapatkan dari perhitungan LCOE.

4) *Diesel Generator*: Diesel Generator (DG) adalah perangkat penghasil daya listrik yang memiliki dua bagian utama: *Engine* (mesin penggerak) dan *Generator* (pembangkit). *Engine* menggunakan bahan bakar seperti solar untuk menggerakkan generator, yang merupakan kumparan tembaga terdiri dari stator dan rotor untuk membangkitkan listrik. Dalam sistem hibrida, DG berfungsi sebagai cadangan tenaga listrik yang akan aktif apabila daya utama tidak mampu memenuhi permintaan konsumen. Kehadiran DG ini penting karena dapat meningkatkan keandalan sistem dan juga membuat sistem menjadi lebih hemat biaya[7]. Biaya operasi dari pembangkit listrik termal dapat dinyatakan dalam persamaan (5).

$$C(G_T) = a_0 + a_1P + a_2P^2 \quad (5)$$

5) *Battery Energy Storage System*: Dalam sistem REIDI, teknologi *Battery Energy Storage System* (BESS) diimplementasikan menggunakan dua jenis baterai utama, yaitu *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA) dan *Lithium Ferro Phosphate* (LFP). Pemilihan ini didasarkan pada keunggulan karakteristik masing-masing untuk mendukung fleksibilitas dan efisiensi sistem penyimpanan energi. Dalam membandingkan performa VRLA dan LFP, aspek efisiensi menjadi perhatian utama, di mana VRLA memiliki efisiensi rata-rata sekitar 85%, sedangkan LFP mencapai sekitar 95%. Selain efisiensi, umur siklus juga menunjukkan perbedaan signifikan, pada kondisi *Depth of Discharge* (DoD) 80% dan suhu 27°C, VRLA mampu mencapai sekitar 1.500 siklus, sedangkan LFP hingga 6.000 siklus[8]. Jumlah energi yang tersedia dalam baterai listrik umumnya diukur melalui parameter yang disebut *state of charge* (SOC).

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{(P_{B,CH} \times \eta_{B,CH} - \frac{P_{B,DIS}}{\eta_{B,DIS}}) \Delta t}{Q_B V_B N_B} \quad (6)$$

Biaya siklus energi melalui baterai ($C_{B,CH}$) untuk suatu daya tertentu dapat dihitung sebagai berikut [9]:

$$C_{B,CH} = \frac{C_{B,IN}}{Q_B V_B N_{cycles} \eta_{B,CH}} P_{B,CH} \quad (7)$$

Selama fase pelepasan daya (*discharge*), rata-rata biaya untuk memasok daya tertentu menggunakan baterai selama 1 jam dapat dihitung sebagai berikut:

$$C_{B,DIS} = \frac{C_{B,IN}}{Q_B V_B N_{cycles} \sqrt{\eta_{B,DIS}}} P_{B,DIS} \quad (8)$$

Seminar Nasional Teknik Elektro

6) *Hydrogen Energy Storage System*: Sistem HESS terdiri dari elektroliser, tangki hidrogen bertekanan tinggi beserta kompresor (CM & H₂ tank), dan sel bahan bakar *proton exchange membrane* (PEMFC). Ketika energi terbarukan melebihi permintaan, elektroliser memproduksi hidrogen, dan laju molarnya (n_{H_2EL}) bergantung pada daya yang diberikan (P_{EL}) sesuai hukum Faraday, yaitu:

$$n_{H_2EL} = \frac{\eta_{EL} P_{EL}}{LHV_{H_2}} \quad (9)$$

Dengan LHV(H₂) sebesar 240 MJ/kmol dan η_{EL} adalah efisiensi elektroliser. Hidrogen ini dapat digunakan kembali oleh *fuel cell* untuk menghasilkan listrik saat beban puncak, di mana konsumsi hidrogen (n_{H_2FC}) terhadap daya keluaran (P_{FC}) dirumuskan sebagai:

$$n_{H_2FC} = \frac{P_{FC}}{\eta_{FC} \times LHV_{H_2}} \quad (10)$$

Tekanan tangki hidrogen ($P_{H_2}(t)$) pada waktu t menjadi variabel kontrol penting karena mencerminkan jumlah hidrogen dalam tangki dan ditentukan oleh perbedaan antara aliran molar yang dihasilkan dan dikonsumsi, serta tekanan pada waktu sebelumnya, sebagaimana dirumuskan:

$$P_{H_2}(t) = P_{H_2}(t-1) + \frac{RT_{H_2}}{V_{H_2}} (n_{H_2EL} - n_{H_2FC}) \quad (11)$$

Dengan R sebagai konstanta gas, (T_{H_2}) = 313 K, dan (V_{H_2}) = 6 m³. Salah satu aspek penting lainnya dalam HESS adalah *utilization cost*. Rumus *utilization cost* dinyatakan sebagai berikut [10]:

$$C_{Cycling_HESS} = \frac{C_{EL,IN} + C_{O\&M,EL} + C_{FC,IN} + C_{O\&M,FC}}{\eta_{EL} \times \eta_{FC}} \quad (12)$$

7) *PYOMO (Python Optimization Modeling Objects)*: PYOMO (*Python Optimization Modeling Objects*) adalah perangkat *open source* yang memungkinkan perumusan dan penyelesaian masalah optimasi menggunakan bahasa Python. PYOMO menyediakan kelas untuk mendefinisikan himpunan, parameter, variabel, serta menyusun fungsi objektif dan batasan dalam bentuk aljabar. Perangkat ini mendukung model linear, *mixed-integer*, nonlinear, dan nonlinear *mixed-integer* berskala besar. Penelitian ini menggunakan pendekatan *Mixed Integer Nonlinear Programming* (MINLP) karena melibatkan variabel kontinyu dan diskrit serta fungsi objektif nonlinear seperti biaya kuadrat diesel, dengan kompleksitas tambahan dari batasan BESS dan HESS.

8) *Optimal Scheduling Strategy*: Penjadwalan pembangkitan terbagi menjadi dua masalah utama yaitu *Unit Commitment* (UC) yang menentukan status *on/off* generator dalam horizon harian/mingguan, dan *Economic Dispatch* (ED) yang mengatur output daya tiap unit untuk meminimalkan biaya operasional dalam waktu lebih pendek, pada sistem energi hibrida REIDI. Sistem ini dievaluasi dalam dua fungsi utama: pertama, sebagai pembangkit energi yang bertujuan memaksimalkan ekspor energi bersih ke jaringan PLN, dengan dua sub-skenario yaitu tanpa dan dengan mempertimbangkan biaya investasi untuk analisis kelayakan ekonomi. Kedua, REIDI difungsikan sebagai *living laboratory* untuk mensimulasikan berbagai kondisi operasional microgrid melalui empat skenario: *on-grid* normal, *on-grid* dengan pembatasan daya, *off-grid* dengan baterai sebagai pembentuk jaringan (*grid forming*), dan *off-grid* dengan diesel sebagai pembentuk jaringan. Pengembangan skenario ini didasarkan pada konsep operasi *stand-alone* untuk kemandirian energi dan *grid-connected* untuk mendukung stabilitas jaringan, sehingga memungkinkan eksplorasi fleksibilitas dan potensi optimasi sistem secara menyeluruh.

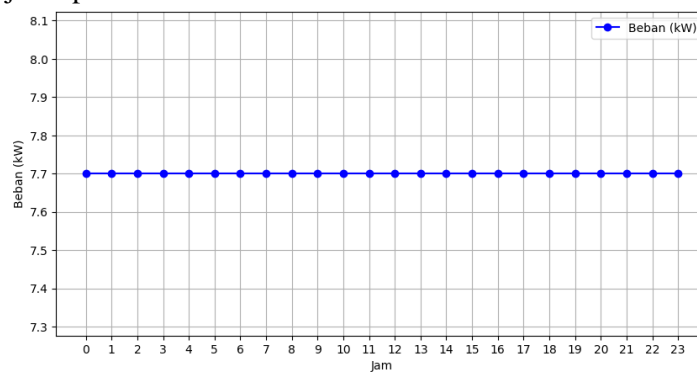
9) *Fungsi Objektif dan Batasan dalam Optimasi Sistem Energi Hibrida*: Dalam strategi operasi sistem energi hibrida, fungsi objektif memegang peran penting dan umumnya dibagi menjadi tiga kategori: ekonomis (meminimalkan biaya), teknis (meningkatkan keandalan dan efisiensi), serta lingkungan (mengurangi emisi dan memaksimalkan energi terbarukan). Penelitian ini berfokus pada aspek ekonomis, yakni meminimalkan total biaya operasional harian sistem REIDI, mencakup biaya PV (berdasarkan LCOE), biomassa, diesel, BESS (LFP dan VRLA), HESS, dan interaksi dengan jaringan. Optimasi dilakukan dengan memperhatikan constraint seperti keseimbangan energi, kapasitas pembangkit, batas SOC baterai, tekanan tangki hidrogen, serta larangan jual-beli daya simultan dengan jaringan.

B. Metodologi

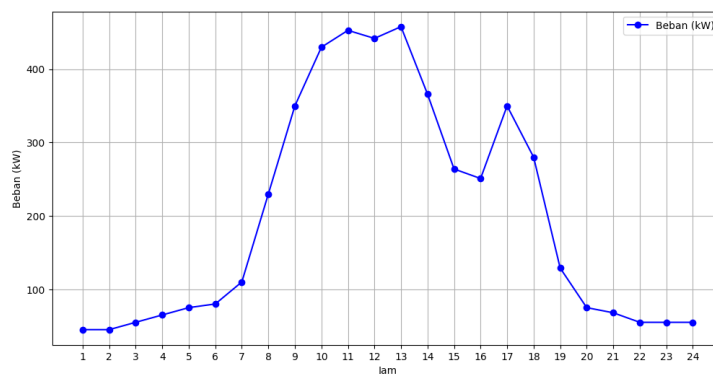
Bab 3 membahas perancangan pola operasi optimal sistem hibrida sumber energi terbarukan di *Living Laboratory* REIDI dengan tujuan memperoleh strategi operasi terbaik dari pembangkit dan sistem

penyimpanan energi berdasarkan dua fokus utama: sebagai pembangkit energi dan sebagai *Living Laboratory*. Proses dimulai dari identifikasi spesifikasi teknis dan karakteristik sistem seperti tenaga surya, biomassa, diesel, baterai, dan hidrogen, dilanjutkan dengan penentuan parameter operasional serta batasan teknis tiap komponen. Optimasi pola operasi dilakukan menggunakan PYOMO dalam dua skenario: (1) REIDI sebagai pembangkit energi terbarukan, untuk memaksimalkan ekspor energi bersih ke jaringan baik tanpa maupun dengan memperhitungkan biaya investasi, dan (2) REIDI sebagai *Living Laboratory*, yang dianalisis dalam kondisi *on-grid* (terhubung PLN termasuk saat pembatasan daya) dan *off-grid* (operasi mandiri dengan pendekatan *battery grid forming* dan *diesel grid forming*). Hasil optimasi berupa pola penyediaan dan distribusi daya per jam dari setiap sumber dan penyimpanan energi sesuai dengan tujuan dan batasan skenario.

1) *Data Optimasi Sistem REIDI*: Profil beban (*load profile*) pada sistem REIDI merupakan representasi pola konsumsi energi listrik yang bervariasi sepanjang waktu. Data profil beban harian yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gbr. 2 dan Gbr. 3.



Gbr. 2 Data Profil Beban REIDI Pada Skenario REIDI Sebagai Pembangkit *Renewable Energy*



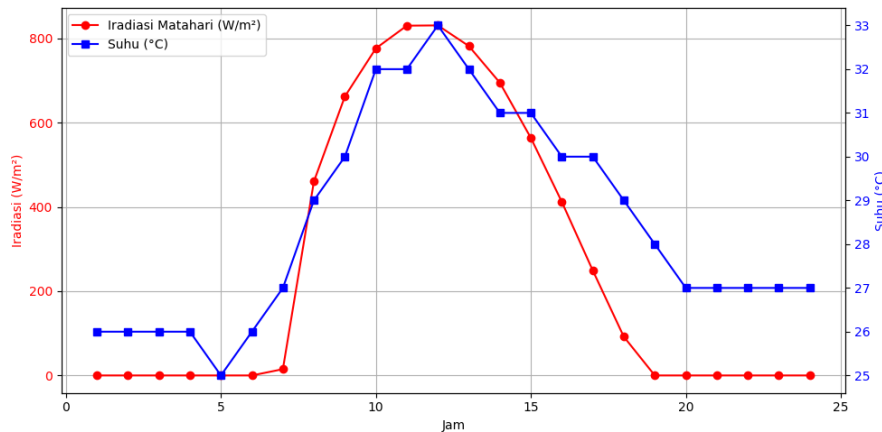
Gbr. 3 Data Profil Beban REIDI Pada Skenario REIDI Sebagai *Living Laboratory*

2) *Pembangkit Listrik Tenaga Surya*: Sistem PLTS di REIDI memiliki total kapasitas 500 kWp, terdiri dari lima subsistem: dua PV *agrivoltaic* masing-masing 100 kWp, PV *ground-mounted* 150 kWp, *floating PV* 100 kWp, dan *rooftop PV* 50 kWp. Modul surya yang digunakan adalah Trinasolar 550 Wp dengan daya STC sebesar 550 Wp. Spesifikasi lengkap panel surya disajikan sebagai berikut.

TABEL I
SPESIFIKASI TRINASOLAR 550 WP

No	Spesifikasi	Nilai
1.	Daya_STC	550 Wp
2.	Koefisien Suhu	-0,34%/C°
3.	NOCT	43 C°

Biaya investasi sistem PLTS rooftop sebesar Rp10.317.358 per kWp dijadikan sebagai acuan dasar penentuan *capital cost* sistem *photovoltaic*. Profil lengkap iradiasi dan suhu rata-rata 24 jam berdasarkan data AccuWeather ditampilkan pada Gbr. 4.



Gbr. 4 Grafik Profil Irradiance dan Suhu Rata-Rata Dalam 24 Jam

Perhitungan biaya energi menggunakan pendekatan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) dengan *discount rate* sebesar 10% untuk merepresentasikan biaya modal dan risiko proyek. Biaya operasi dan pemeliharaan (O&M) sistem PLTS sebesar Rp48.127,1 ribu per kWp per tahun, mengacu pada standar rata-rata proyek PLTS skala besar di Indonesia.

3) *Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa*: Dalam optimasi ini, pembangkit biomassa menggunakan serbuk gergaji (*sawdust*) sebagai bahan bakar. Sistem memiliki daya maksimum 50 kW dengan efisiensi termal 22%, dan nilai kalor *sawdust* sebesar 4.015 kkal/kg. Pembangkit diasumsikan dapat beroperasi hingga 24 jam per hari. Harga bahan bakar *sawdust* yang digunakan adalah Rp833.813 per ton. Biaya investasi total dari sistem biomass adalah sebesar RP 386.230.344 dengan umur proyek selama 20 tahun dan biaya O&M sebesar Rp 150,00 per kWh. Digunakan nilai *discount rate* sebesar 10% yang merepresentasikan biaya modal dan risiko proyek.

4) *Pembangkit Listrik Tenaga Diesel*: Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) berkapasitas 100 kW digunakan sebagai sumber daya cadangan dalam sistem *hybrid* REIDI. PLTD berfungsi menjamin kontinuitas suplai saat energi terbarukan tidak mencukupi. Konsumsi bahan bakarnya bergantung pada tingkat beban operasional, dan rinciannya ditampilkan pada TABEL II.

TABEL II
KONSUMSI BAHAN BAKAR DIESEL GENERATOR

Generator Size (kW)	1/4 Load (L/jam)	1/2 Load (L/jam)	3/4 Load (L/jam)	Full Load (L/jam)
100	9,84	15,52	21,96	28,01

Dari data tersebut, dengan biaya acuan bahan bakar per liter sebesar Rp.13.350,00 dan biaya O&M sebesar Rp 3.337 yang didapatkan dari asumsi biaya O&M 3% dari harga diesel generator sebesar Rp 974.424.000 sehingga dapat dihitung model biaya operasi PLTD sebagai berikut :

$$C(P) = 4,0228P^2 + 2731,41P + 63.901,5 \quad (13)$$

5) *Battery Energy Storage System*: BESS terdiri dari dua jenis baterai yaitu *Lithium Ferro Phosphate* (LFP) dan *Valve-Regulated Lead Acid* (VRLA), masing-masing berkapasitas 200 kWh dengan daya keluaran maksimum 100 kVA. SOC dibatasi antara 20%–80% untuk menjaga keamanan dan umur pakai baterai. Operasi kedua sistem baterai didukung oleh inverter dengan spesifikasi yang disajikan pada TABEL III.

TABEL III

SPESIFIKASI INVERTER

Type Inverter	<i>Inverter Off-Grid</i>
Tegangan DC nominal	48 Vdc
<i>Rated Power</i>	6 kW
Harga	Rp 37.500.000

Spesifikasi dari baterai LFP dan VRLA dapat dilihat dalam TABEL IV.

TABEL IV
SPESIFIKASI BATERAI LFP DAN VRLA

Jenis Baterai	Valve Regulated Lead Acid (VRLA)	Lithium Ferro Phosphate (LFP)
Nominal Voltage	12 Vdc	12 Vdc
Rated Capacity	100 Ah	100 Ah
Jumlah Baterai	168	168
Baterai per string	4	4
Lifetime	1500 cycle	6000 cycle
Effisiensi	0,85	0,95
Harga satuan	Rp 2.400.000	Rp 5.250.000
Biaya O&M	1922/jam	3562/jam

6) Hydrogen Energy Storage System: Dalam penelitian ini, HESS terdiri dari dua komponen utama yaitu *Electrolyzer* (6 kW) dan *Fuel Cell* (2 x 5 kW), dengan volume tangki hidrogen sebesar 4 m³. Spesifikasi lengkap *fuel cell* dan elektroliser disajikan pada TABEL V dan TABEL VI.

TABEL V
SPESIFIKASI FUEL CELL

Fuel Cell	
Nominal Power	6 kW
Minimum	0,5 kW
Effisiensi	0,4225
H2 Production rate	1,05 Nm ³ /h
Delivery pressure	13,8 bar
Electrolyte	PEM
Harga	Rp 1.436.250.000

TABEL VI
SPESIFIKASI ELECTROLYZER

Electrolyzer	
Nominal Power	5 kW
Minimum Power	1,5 kW
Effisiensi	0,52
H2 Production rate	3,90 Nm ³ /h
Minimum Pressure	2 bar
Electrolyte	PEM
Harga	Rp 1.072.400.000

7) Fungsi objektif dan Batasan: Optimasi dilakukan untuk meminimalkan total biaya dari sistem pembangkit, meliputi biaya PV, diesel, biomassa, serta sistem penyimpanan (BESS dan HESS), termasuk proses *charging* dan *discharging*. Fungsi biaya sistem dirumuskan pada persamaan (14).

$$\begin{aligned} \min F = \min \sum_{t=0}^{24} & C_{PV} Total + C_{BMG} + (P_{Diesel} \times C_{Diesel}) + (P_{B,CH_{LFP}} \times C_{B,CH_{LFP}}) \\ & + (P_{B,DIS_{LFP}} \times C_{B,DIS_{LFP}}) + (P_{B,CH_{VRLA}} \times C_{B,CH_{VRLA}}) + (P_{B,DIS_{VRLA}} \times C_{B,DIS_{VRLA}}) \\ & + (P_{FC} \times C_{cyclingH2}) + (P_{EL} \times C_{cyclingH2}) + C_{Grid} \end{aligned} \quad (14)$$

Perancangan strategi operasi optimal sistem REIDI harus memenuhi kendala teknis demi menjaga keandalan. Prinsip utamanya adalah keseimbangan antara produksi dan konsumsi daya setiap saat. Total daya dari pembangkit (PV, Diesel, Biomassa), sistem penyimpanan (BESS dan HESS), serta jaringan, harus sama dengan total beban yang dilayani.

$$\begin{aligned} P_{PV_Total}(t) + P_{Diesel}(t) + P_{Biomass}(t) + P_{B,DIS_LFP}(t) + P_{B,DIS_VRLA}(t) + P_{FC}(t) + P_{Gridbuy}(t) \\ = P_{Load}(t) + P_{B,CH_LFP}(t) + P_{B,CH_VRLA}(t) + P_{EL}(t) + P_{Gridsell}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

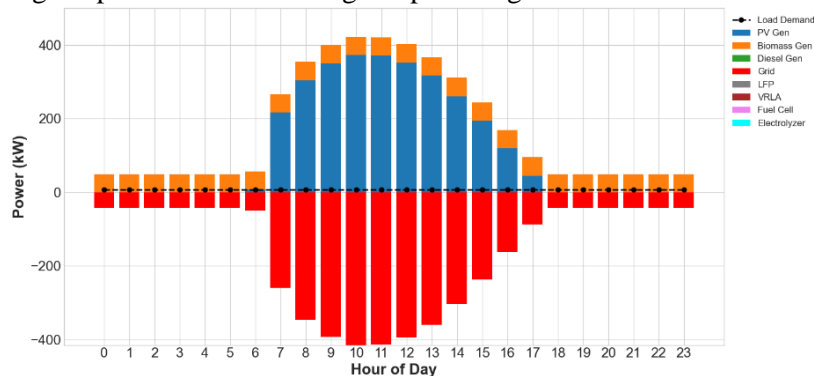
Selain batasan keseimbangan daya, dalam perancangan sistem REIDI, setiap komponen pembangkit dan penyimpanan memiliki batas daya maksimum dan minimum yang harus dipatuhi, termasuk pembangkit biomassa, diesel, PV, baterai (LFP dan VRLA), serta *fuel cell* dan jaringan PLN. Untuk sistem penyimpanan, SOC baterai dan tekanan hidrogen harus dijaga dalam rentang yang ditentukan, dengan kondisi akhir SOC sama seperti awal untuk menjaga kestabilan sistem. Selain itu, agar operasi tetap efisien, beberapa proses tidak boleh terjadi bersamaan, seperti pengisian dan pengosongan baterai atau pembelian dan penjualan daya ke jaringan.

8) *Proses Optimasi*: Proses optimasi dalam penelitian ini bertujuan merancang pola operasi optimal sistem energi hibrida REIDI dengan mempertimbangkan efisiensi biaya operasional dan ekspor energi bersih, menggunakan pendekatan *Mixed-Integer Nonlinear Programming* (MINLP) melalui platform PYOMO. Optimasi mencakup dua fokus utama: pertama, REIDI sebagai pembangkit energi terbarukan, dengan dua sub-skenario yaitu (a) memaksimalkan ekspor energi bersih ke jaringan PLN dan (b) memaksimalkan ekspor dengan memperhitungkan biaya investasi infrastruktur energi terbarukan seperti PV, angin, dan biomassa; serta kedua, REIDI sebagai *Living Laboratory*, yang dianalisis dalam dua kondisi, yaitu (a) *on-grid*, terdiri dari skema operasi normal tanpa batasan pembelian energi dan skema dengan pembatasan minimum 666,6 kWh/hari sesuai ketentuan rekening minimum PLN, serta (b) *off-grid*, yang mensimulasikan kondisi daerah terpencil dengan dua pendekatan *grid-forming*: menggunakan baterai yang menghasilkan referensi tegangan dan frekuensi untuk mendukung penetrasi tinggi energi terbarukan dengan respons cepat, serta menggunakan diesel generator sebagai referensi utama yang lebih stabil untuk beban besar namun berdampak pada tingginya biaya bahan bakar dan emisi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. REIDI Sebagai Pembangkit Energi Terbarukan

1) *Pola Operasi Memaksimalkan Total Ekspor Energi Bersih ke Jaringan Listrik*: Skenario operasi memaksimalkan total ekspor energi bersih ke jaringan dirancang untuk mengoptimalkan kontribusi REIDI dalam penyediaan energi bersih nasional dengan memaksimalkan pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti PV dan biomassa. Pola operasi ini memastikan kebutuhan internal REIDI terpenuhi secara efisien, sementara surplus energi dialokasikan sepenuhnya untuk diekspor ke jaringan PLN. Sistem diesel hanya digunakan sebagai cadangan dalam kondisi darurat ketika energi terbarukan tidak mencukupi. Analisis ekonomi dalam skenario ini berfokus pada biaya *Operation and Maintenance* (O&M), sehingga dapat mengevaluasi keuntungan operasional dari strategi ekspor energi bersih secara lebih akurat.

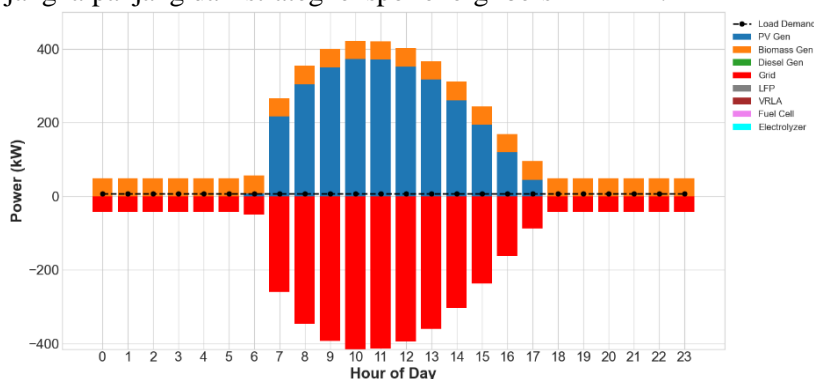


Gbr. 5 Diagram Beban dan Pembangkitan Pada Skenario Memaksimalkan Total Ekspor Energi Bersih ke Jaringan

Berdasarkan Gbr. 5, pola operasi optimal selama 24 jam menunjukkan bahwa pembangkitan utama berasal dari PV yang aktif pukul 06:00–17:00 dengan puncak 371,98 kW pada pukul 10:00, dan biomassa yang stabil 50 kW sepanjang hari. Komponen lain seperti diesel, baterai, dan *fuel cell* tidak digunakan karena PV dan biomassa mencukupi. Beban sistem stabil di sekitar 7,7 kW, sementara ekspor energi ke jaringan (ditunjukkan area merah) mencapai puncak 414,28 kW saat produksi PV maksimal. Hasil menunjukkan data operasional sistem dalam skenario maksimalisasi ekspor energi bersih selama 24 jam, dengan beban tetap 7,70 kW (184,80 kWh/hari). PV menghasilkan 2.910,49 kWh (Rp 65.927,53) dengan pola *bell curve*, sementara biomassa stabil 50 kW sepanjang hari menghasilkan 1.200 kWh (Rp 1.154.182,07). Tidak ada

pembelian energi dari jaringan, menandakan sistem mandiri, dan total ekspor mencapai 3.925,69 kWh (Rp 5.554.848,19), dengan puncak 414,28 kW pada jam 10:00 dan minimum 42,30 kW saat malam. Biaya operasional minimum Rp 1.220.109,61, menghasilkan keuntungan Rp 4.334.738,58. Strategi ini terbukti efektif dengan rasio nilai ekspor 3,5 kali biaya operasional, menunjukkan potensi pendapatan tinggi dan keandalan energi lokal.

2) *Pola Operasi Memaksimalkan Total Ekspor Energi Bersih ke Jaringan Listrik Mempertimbangkan Investasi:* Skenario memaksimalkan ekspor energi bersih dengan mempertimbangkan investasi merupakan analisis komparatif terhadap skenario sebelumnya, dengan pola operasi yang sama namun pendekatan ekonomi yang lebih komprehensif. Sistem tetap memprioritaskan pemanfaatan maksimal PV dan biomassa untuk menghasilkan surplus energi yang diekspor ke jaringan PLN, tanpa menggunakan diesel, baterai, *fuel cell*, maupun *electrolyzer*. Diagram pada Gbr. 6 menunjukkan pola pembangkitan dan ekspor energi identik dengan skenario sebelumnya, termasuk puncak produksi PV sebesar 371,98 kW dan ekspor maksimum 414,28 kW pada jam 10:00, serta beban tetap 7,7 kW sepanjang hari. Perbedaan utama terletak pada aspek ekonomi, di mana perhitungan dalam skenario ini mencakup biaya investasi (*capital expenditure*) selain biaya O&M dan bahan bakar, sehingga meskipun energi yang diekspor sama, keuntungan bersih (*net profit*) menjadi lebih rendah. Analisis ini memberikan gambaran yang lebih realistis dan menyeluruh terhadap kelayakan ekonomi jangka panjang dari strategi ekspor energi bersih REIDI.

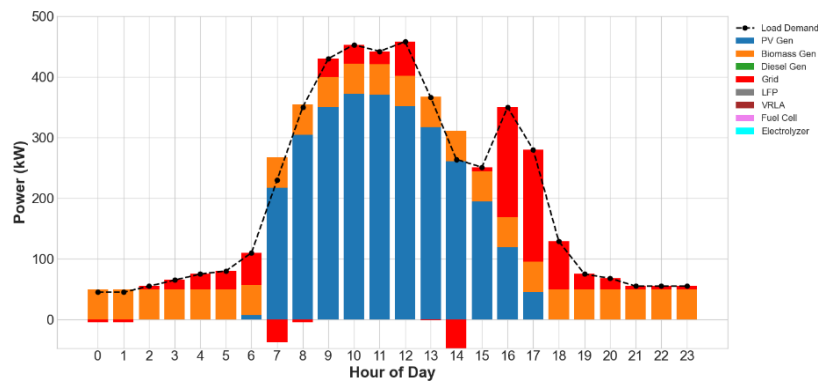


Gbr. 6 Diagram Beban dan Pembangkitan Pada Skenario Memaksimalkan Total Ekspor Energi Bersih ke Jaringan Mempertimbangkan Investasi

Gambar diatas menunjukkan pola operasi sistem pada skenario maksimalisasi ekspor energi bersih dengan mempertimbangkan biaya investasi selama 24 jam. Beban tetap 7,70 kW (184,80 kWh/hari), dengan produksi PV membentuk pola *bell curve* (total 2.910,49 kWh) dan biomassa stabil 50 kW (1.200 kWh). Nilai ekonomi PV dan biomassa masing-masing meningkat menjadi Rp 3.137.112,56 dan Rp 1.278.473,78 karena memasukkan biaya investasi. Ekspor energi tetap 3.925,69 kWh dengan pendapatan Rp 5.554.848,19, identik dengan skenario sebelumnya. Namun, total biaya operasional meningkat, menurunkan keuntungan bersih menjadi Rp 1.139.261,85. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun surplus energi tetap, margin keuntungan turun signifikan akibat dampak biaya investasi terhadap kelayakan finansial proyek.

B. REIDI Sebagai Living Laboratory

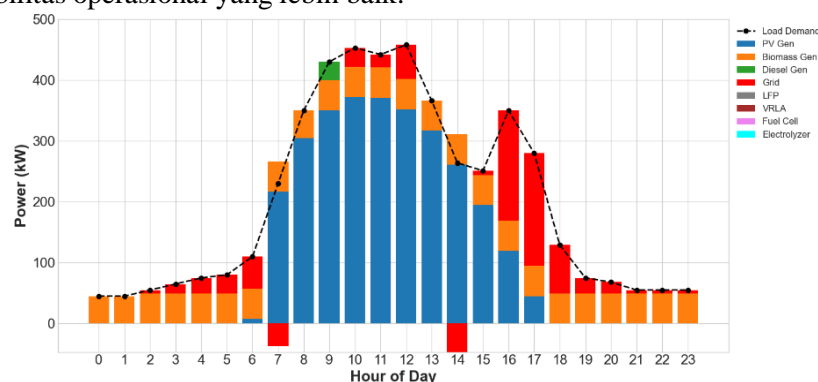
1) *Pola Operasi REIDI Terhubung Jaringan (Operasi Normal):* Skenario operasi normal dirancang sebagai *baseline* untuk mengevaluasi pola operasi optimal REIDI tanpa batasan interaksi dengan jaringan PLN. Tujuannya adalah meminimalkan biaya operasional melalui *merit order dispatch*.



Gbr. 7 Diagram Beban dan Pembangkitan Pada Skenario *Normal Operation*

Gbr. 7 menunjukkan distribusi optimal daya pada skenario *normal operation* selama 24 jam, dengan strategi dispatch yang memaksimalkan pemanfaatan PV (biru) selama iradiasi (06:00–17:00) tanpa pemangkasan daya, serta biomassa (oranye) beroperasi stabil 50 kW sebagai *baseload*. Area merah di bawah grafik menunjukkan ekspor energi saat terjadi surplus, terutama pada jam 00:00–01:00, 07:00–08:00, dan 13:00–14:00, sedangkan area merah di atas menunjukkan impor energi dari jaringan saat produksi lokal tidak mencukupi, terutama pada malam hari dan siang menjelang sore. Pola ini mencerminkan optimasi ekonomi murni dengan prinsip menjual surplus energi murah dan membeli energi saat diperlukan. Total biaya operasional minimum dalam skenario ini mencapai Rp 6.905.072,15, dengan kontributor terbesar berasal dari sistem PV sebesar Rp 3.137.112,56 (45,43%), diikuti oleh biomassa sebesar Rp 1.278.473,78 (18,51%) dan biaya tetap diesel generator yang sama besar (22,22%). Biaya bersih dari jaringan (*net cost*) tercatat Rp 955.849,81 (13,84%), dihitung dari selisih pembelian energi Rp 1.096.490,77 dan pendapatan penjualan Rp 140.640,96.

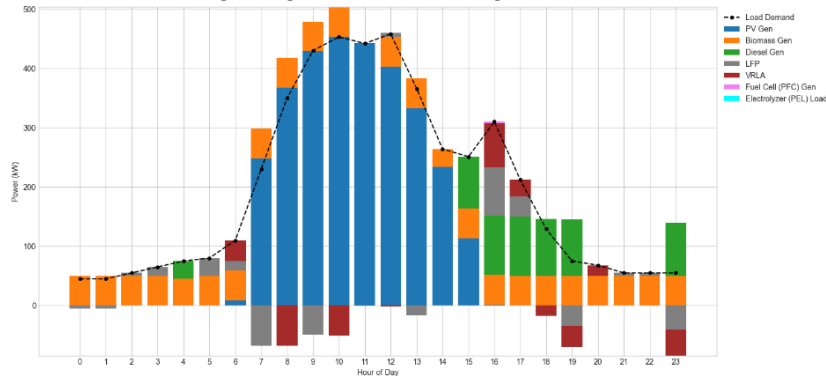
2) *Pola Operasi REIDI Terhubung Jaringan (Pembatasan Daya Jaringan)*: Berbeda dengan skenario operasi normal yang bebas berinteraksi dengan jaringan PLN, skenario minimalisasi jaringan mempertimbangkan regulasi dan kemandirian energi, khususnya kewajiban rekening minimum 666,6 kWh per hari dari daya terpasang 500 kVA. Untuk menghindari pemborosan pembayaran tanpa pemanfaatan energi, sistem dioptimalkan dengan pembelian minimum dari jaringan dan pemanfaatan maksimal baterai guna mengurangi ketergantungan. Strategi ini tetap mengutamakan penggunaan PV sebagai sumber energi gratis dan biomassa berbiaya rendah (Rp 1.065,39/kWh), dengan sambil mengintegrasikan penyimpanan energi untuk fleksibilitas operasional yang lebih baik.



Gbr. 8 Diagram Beban dan Pembangkitan Pada Skenario Pembatasan Daya Jaringan

Total biaya operasional minimum pada skenario *on-grid* dengan pembatasan daya jaringan mencapai Rp 6.955.767,42, meningkat 0,73% dari skenario sebelumnya. Biaya terbesar berasal dari PV (Rp 3.137.112,56), diikuti biomassa (Rp 1.255.889,68) dan net jaringan (Rp 943.239,00), yang turun 1,32% akibat berkurangnya produksi biomassa dan tidak digunakannya diesel generator. Meski tidak beroperasi, diesel tetap membebankan *fixed cost* sebesar Rp 1.619.526,17. Total beban tetap 4.786 kWh, produksi PV 2.910,49 kWh, energi biomassa turun menjadi 1.178,8 kWh, pembelian jaringan turun menjadi 749,9 kWh, dan penjualan menjadi 83,3 kWh, menghasilkan net energi 666,6 kWh sesuai batas minimum.

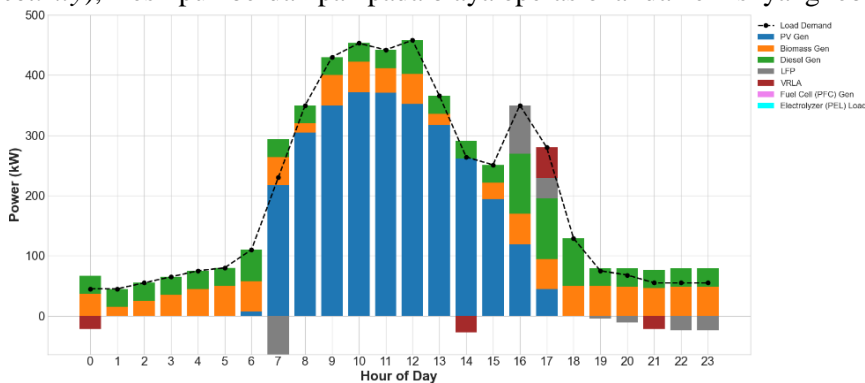
3) *Pola Operasi REIDI Tanpa Terhubung Jaringan (Battery Grid Forming):* Skenario *Battery Grid Forming* menempatkan BESS sebagai *master controller* yang membentuk dan menjaga tegangan serta frekuensi sistem. Inverter BESS beroperasi dalam mode *grid-forming* untuk memastikan stabilitas saat terjadi fluktuasi beban dan mendukung integrasi sumber energi terbarukan.



Gbr. 9 Diagram Beban dan Pembangkitan Pada Skenario *Battery Grid Forming*

Dari Gbr. 9, total beban 4.786 kWh tetap, dengan PV menghasilkan 2.910,49 kWh dan biaya Rp 3.137.112,56. Biomassa menyuplai 1.200 kWh (Rp 1.278.473,78), sedangkan diesel hanya 709,66 kWh namun menimbulkan biaya tinggi (Rp 3.637.262) akibat konsumsi bahan bakar dan *fixed cost idle*. Baterai LFP mencatat *charging* 150,71 kWh dan *discharging* 136,01 kWh dengan biaya Rp 341.742,95, lebih efisien dibanding VRLA (*charging* 70,10 kWh, *discharging* 50,65 kWh, biaya Rp 300.906,66). *Fuel cell* dan elektroliser tidak digunakan. Total biaya operasional pada skenario *off-grid* mencapai Rp 8.695.497,95 sekitar 1,5 kali lebih tinggi dari *on-grid* karena absennya jaringan memerlukan peran besar dari penyimpanan energi dan pembangkit cadangan demi menjaga keandalan sistem.

4) *Pola Operasi REIDI Tanpa Terhubung Jaringan (Diesel Grid Forming):* Skenario *Diesel Grid Forming* menempatkan diesel generator sebagai *master unit* yang membentuk dan menjaga referensi tegangan serta frekuensi sistem secara mandiri. Pendekatan ini merepresentasikan kondisi umum di wilayah kepulauan, di mana diesel menjadi pembangkit utama, sedangkan energi terbarukan dan penyimpanan hanya berperan sebagai pendukung untuk mengurangi konsumsi bahan bakar. Fokus utamanya adalah keandalan pasokan (*supply security*), meskipun berdampak pada biaya operasional dan emisi yang lebih tinggi.



Gbr. 10 Diagram Beban dan Pembangkitan Pada Skenario *Diesel Grid Forming*

Berdasarkan Gambar diatas, total energi yang disuplai sistem sebesar 4.786 kWh, didominasi oleh PV sebesar 2.910,49 kWh (Rp 3,13 juta), diikuti biomassa 948,82 kWh (Rp 1,01 juta), dan diesel generator 958,56 kWh (Rp 4,35 juta), yang biayanya meningkat 20% karena perannya sebagai *unit grid forming* yang beroperasi kontinu 24 jam. Baterai LFP menunjukkan efisiensi baik dengan pengisian 127,33 kWh dan pengosongan 114,91 kWh (Rp 216.497), sementara VRLA memiliki siklus lebih mahal meski energi lebih kecil (pengisian 70,1 kWh, pengosongan 50,65 kWh, biaya Rp 254.778). Diesel sebagai penyedia base load menurunkan peran biomassa dan baterai, yang kini hanya aktif saat beban puncak. Baterai LFP lebih dominan karena lebih ekonomis dibanding VRLA. Dengan konfigurasi PV, biomassa, diesel, dan baterai, seluruh kebutuhan beban tercukupi tanpa perlu aktivasi *fuel cell* dan elektroliser.

IV. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian mengenai desain pola operasi sistem hibrida, diperoleh beberapa temuan penting. Pada skenario memaksimalkan ekspor energi bersih ke jaringan, sistem mencapai konfigurasi optimal dengan pemanfaatan penuh PV sebesar 2.910,49 kWh dan biomassa sebagai baseload 1.200 kWh, sehingga mampu mengekspor 3.925,69 kWh tanpa pembelian dari jaringan, menghasilkan keuntungan Rp 4.334.738,58 setelah dikurangi biaya Rp 1.220.109,61. Namun, ketika biaya investasi diperhitungkan, keuntungan turun drastis 73,7% menjadi Rp 1.139.261,85 akibat kenaikan biaya PV Rp 3.137.112,56 dan biomassa Rp 1.278.473,78. Pada operasi on-grid normal, biaya operasional terendah tercatat Rp 6.905.072,15 dengan pemanfaatan PV 100% (2.910,49 kWh), biomassa 24 jam, pembelian listrik 774,91 kWh, dan penjualan 99,39 kWh. Jika pembelian grid dibatasi minimum 666,6 kWh/hari, biaya meningkat tipis 0,73% menjadi Rp 6.955.767,42 akibat pembatasan biomassa dan tambahan penggunaan diesel. Pada skenario off-grid, biaya meningkat signifikan, yakni Rp 8.695.497,95 saat battery berperan sebagai grid forming karena siklus intensif LFP dan VRLA, serta Rp 8.969.408,78 saat diesel menjadi grid forming dengan konsumsi energi 958,56 kWh, lebih tinggi dibandingkan battery grid forming yang membutuhkan 709,66 kWh. PV menunjukkan konsistensi tinggi di semua skenario, sementara biomassa dengan biaya Rp 1.065,39/kWh terbukti ekonomis baik sebagai baseload maupun peaker plant. Adapun fuel cell dan elektroliser tidak digunakan karena kombinasi PV, biomassa, diesel, dan baterai telah mencukupi kebutuhan. Dengan demikian, sistem on-grid direkomendasikan untuk efisiensi ekonomis maksimal, sedangkan sistem off-grid relevan untuk lokasi terpencil atau aplikasi kritis dengan konsekuensi biaya operasional yang lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penelitian ini, mulai dari pengolahan data, simulasi, hingga pelaksanaan penelitian, sehingga hasil yang diperoleh bisa disajikan dalam bentuk publikasi.

REFERENSI

- [1] İ. Çetinbaş, B. Tamyürek, dan M. Demirtaş, "Design, Analysis and Optimization of a Hybrid Microgrid System Using HOMER Software: Eskişehir Osmangazi University Example," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 8, no. 1, hlm. 65–79, Feb 2019, doi: 10.14710/ijred.8.1.65-79.
- [2] M. B. Yusuf, M. A. Baihaqi, dan E. K. Yulyawan, "Energi Terbarukan Optimal: Sistem Hibrid Solar Panel dengan Picohidro Kincir Vertikal sebagai Solusi Pembangkit Listrik Ramah Lingkungan," *INTRO J. Inform. Dan Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, hlm. 1–5, Agu 2023, doi: 10.51747/intro.v2i1.1564.
- [3] A. N. Azizah dan S. Purbawanto, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PV dan Mikrohidro) Terhubung Grid (Studi Kasus Desa Merden, Kecamatan Padureso, Kebumen)," *J. List. Instrumentasi Dan Elektron. Terap. JuLIET*, vol. 2, no. 1, Mei 2021, doi: 10.22146/juliet.v2i1.64365.
- [4] Liyuan Chen dan Yun Liu, "Scheduling strategy of hybrid wind-photovoltaic-hydro power generation system," dalam *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012)*, Hangzhou, China: Institution of Engineering and Technology, 2012, hlm. 65–65. doi: 10.1049/cp.2012.1783.
- [5] A. Alimardani dan S. Jadid, "Optimum scheduling of the HRES for an isolated rural city in Iran," *AUT J. Electr. Eng.*, no. Online First, Mar 2019, doi: 10.22060/ej.2019.13946.5197.
- [6] P. P. Kumar dkk., "Optimal Operation of an Integrated Hybrid Renewable Energy System with Demand-Side Management in a Rural Context," *Energies*, vol. 15, no. 14, hlm. 5176, Jul 2022, doi: 10.3390/en15145176.
- [7] Y. Sawle, S. C. Gupta, dan A. K. Bohre, "Techno-economic scrutiny of HRES through GA and PSO technique," *Int. J. Renew. Energy Technol.*, vol. 9, no. 1/2, hlm. 84, 2018, doi: 10.1504/IJRET.2018.090106.

- [8] V. Karthigeyan, M. Aswin, L. Priyanka, K. N. D. Sailesh, dan K. Palanisamy, “A comparative study of lithium ion (LFP) to lead acid (VRLA) battery for use in telecom power system,” dalam 2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC), Melmaruvathur: IEEE, Mar 2017, hlm. 742–748. doi: 10.1109/ICCPEIC.2017.8290462.
- [9] G. Cau, D. Cocco, dan M. Petrollese, “Modeling and Simulation of an Isolated Hybrid Microgrid with Hydrogen Production and Storage,” *Energy Procedia*, vol. 45, hlm. 12–21, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.003.
- [10] G. Cau, D. Cocco, M. Petrollese, S. Knudsen Kær, dan C. Milan, “Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, hlm. 820–831, Nov 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.078.