BAB II

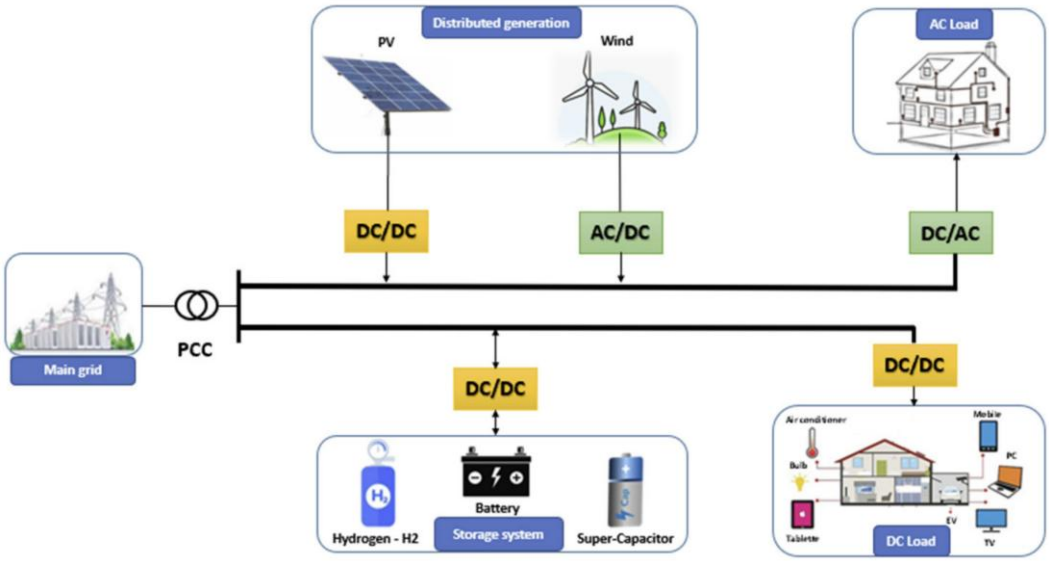
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Konsep Microgrid dan Dedieselisasi

2.1.1 Definisi dan Arsitektur *Microgrid*

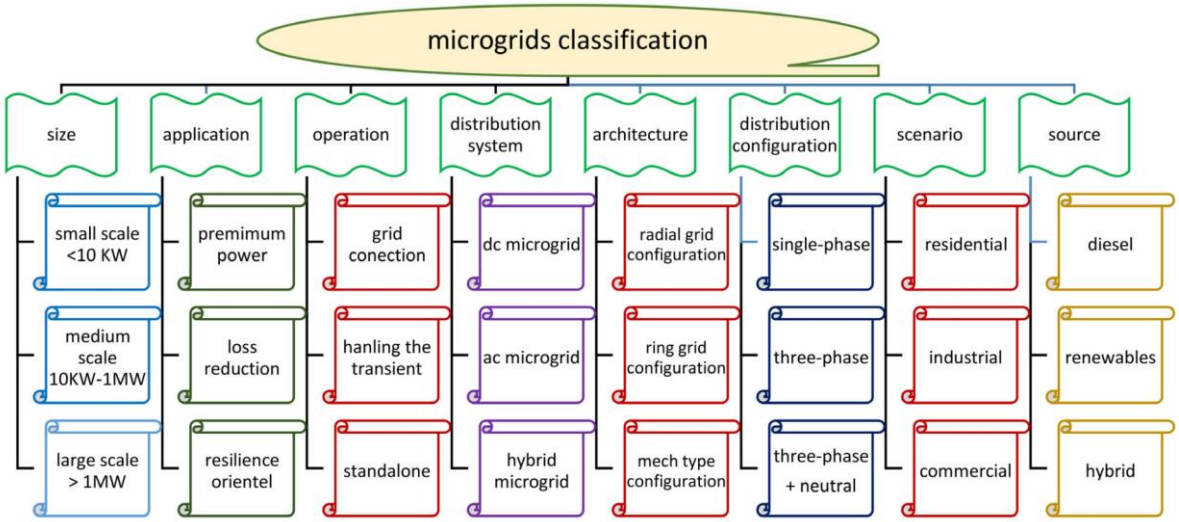
Sistem *Microgrid*, atau jaringan kelistrikan skala kecil, merupakan kumpulan pembangkit listrik terdistribusi yang dapat mencakup pembangkit berbasis energi baru terbarukan (EBT), sistem penyimpanan energi, beban, perangkat kendali, serta jaringan distribusi yang terlokalisasi dalam suatu area tertentu dan memiliki batas yang jelas terhadap jaringan listrik utama (*main grid*). *Microgrid* dirancang untuk mengintegrasikan berbagai sumber pembangkit, termasuk EBT, baik dengan maupun tanpa sistem penyimpanan energi, serta dilengkapi dengan sistem kendali yang memungkinkan beroperasi dalam dua mode, yakni terhubung ke jaringan utama (*on-grid*) maupun berdiri sendiri dalam mode *islanding* (off-grid). Tujuan utama sistem ini adalah meminimalkan risiko gangguan pasokan listrik yang dapat disebabkan oleh faktor cuaca, bencana alam, pemadaman (*outage*), infrastruktur yang menua, maupun tekanan biaya yang menimbulkan ketidakpastian dalam pembangkitan dan distribusi listrik.

Microgrid dapat dirancang dengan beragam topologi dan sistem kontrol sesuai dengan kebutuhan serta kapasitas yang ada. Koneksi antara *Microgrid* dengan jaringan utama dilakukan melalui *Point of Common Coupling* (PCC) yang menjaga level tegangan tetap konsisten dengan jaringan utilitas, kecuali dalam kondisi tertentu seperti gangguan pada jaringan utama, sehingga *Microgrid* beralih ke mode *islanding*. Sistem kontrol dalam *Microgrid* berfokus pada distribusi daya antar berbagai sumber energi dengan tetap menjaga stabilitas jaringan. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1, sistem *Microgrid* dikendalikan melalui beberapa tingkatan kontrol, dimana kontrol utama mengelola operasi *Microgrid* lokal, sementara kontrol sekunder dan tersier berfungsi sebagai pusat kendali yang berhubungan langsung dengan PCC (Ali *et al*., 2021).



Gambar 2. 1 Skema Sistem *Hybrid Microgrid* (Ali *et al*., 2021)

Microgrid dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.2. Sebuah *Microgrid* yang bersifat fleksibel idealnya memiliki kemampuan untuk melakukan impor maupun ekspor energi dari dan ke jaringan utama. Selain itu, *Microgrid* harus mampu mengendalikan aliran daya aktif maupun reaktif, sekaligus mengelola sistem penyimpanan energi agar kontinuitas dan keandalan pasokan listrik tetap terjaga.

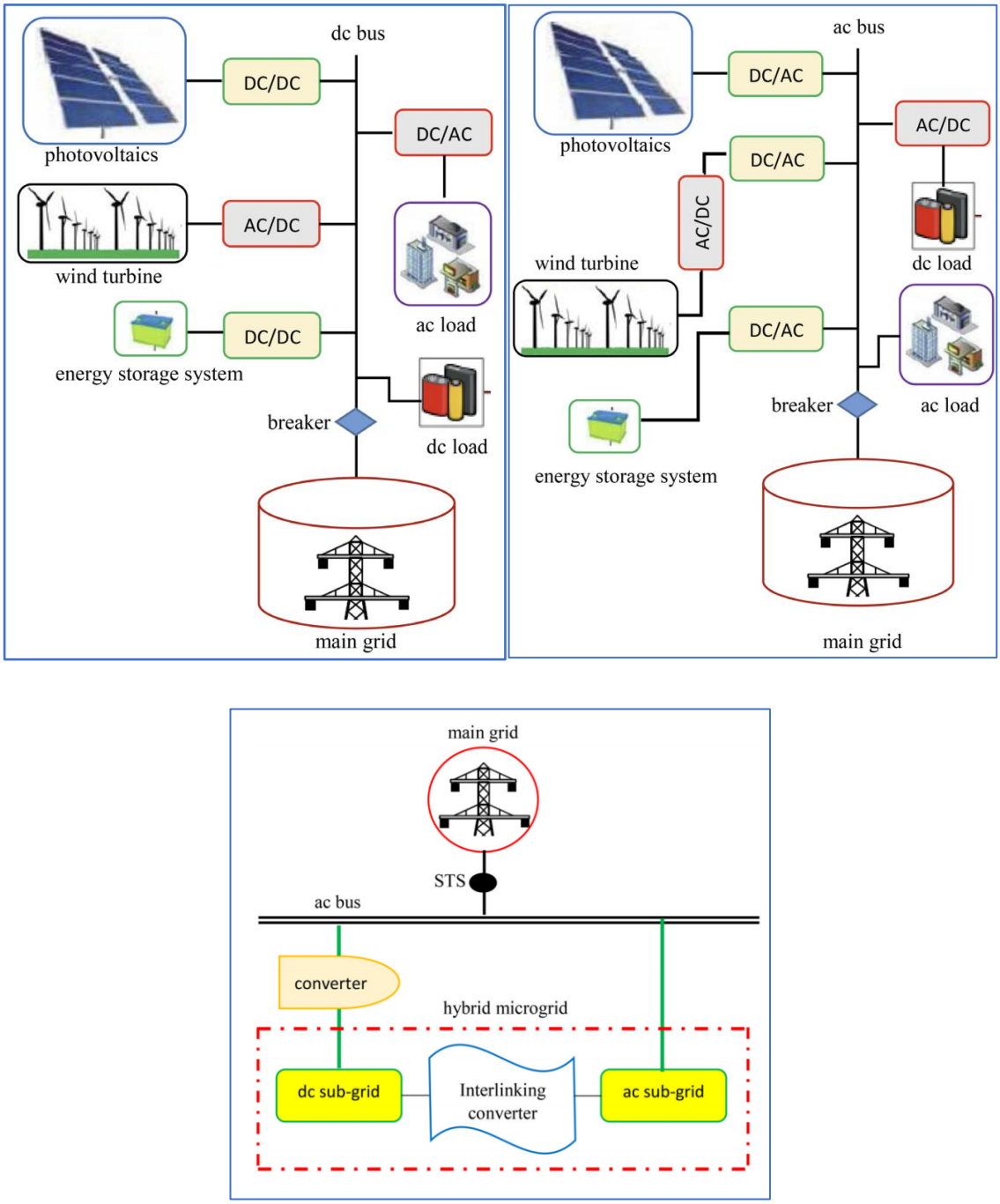


Gambar 2. 2 Klasifikasi *Microgrid* (Shahgholian, 2021)

Microgrid dapat dikategorikan menurut berbagai aspek seperti skala, aplikasi, metode pengoperasian, arsitektur, konfigurasi, maupun sumber energinya. Berdasarkan sistem distribusi dayanya, *Microgrid* diklasifikasikan menjadi tiga tipe utama, yaitu sistem AC, sistem DC, dan sistem hybrid.

Pada sistem AC *Microgrid*, seluruh sumber energi terbarukan (EBT) dan beban terhubung ke *common bus* AC. Keunggulan sistem ini terletak pada kemampuannya menyalurkan daya dalam jarak yang lebih jauh serta fleksibilitas untuk menyesuaikan tingkat tegangan sesuai kebutuhan aplikasi. Umumnya, *Microgrid* AC dihubungkan ke jaringan distribusi tegangan menengah pada titik *Point of Common Coupling* (PCC), dengan pembangkit terdistribusi, penyimpanan energi, dan beban yang terintegrasi dalam jaringan distribusi tersebut. Namun demikian, kelemahan utama sistem AC *Microgrid* adalah kompleksitas dalam pengendalian dan pengoperasian, mengingat setiap pembangkit terdistribusi khususnya EBT harus disinkronkan dengan sistem AC, yang berimplikasi pada kualitas daya dan potensi ketidakseimbangan fasa.

Sebaliknya, sistem DC *Microgrid* menawarkan kemudahan integrasi karena setiap sumber energi terdistribusi (*Distributed Energy Resources* / DER), penyimpanan energi, maupun beban dapat langsung terhubung ke bus DC, dengan kebutuhan konverter AC yang lebih sedikit. Sistem ini memiliki beberapa keunggulan, antara lain tidak memerlukan sinkronisasi antar pembangkit, lebih mudah diintegrasikan dengan sumber EBT yang secara alami menghasilkan keluaran DC, mengurangi rugi-rugi daya karena sistem DC tidak memiliki frekuensi, serta memberikan efisiensi yang lebih tinggi akibat lebih sedikitnya tahap konversi energi. Meski demikian, sistem *Microgrid* DC juga memiliki keterbatasan, antara lain kesulitan dalam tahap awal pembangunan bus DC dan tantangan yang lebih besar dalam merancang sistem proteksi.

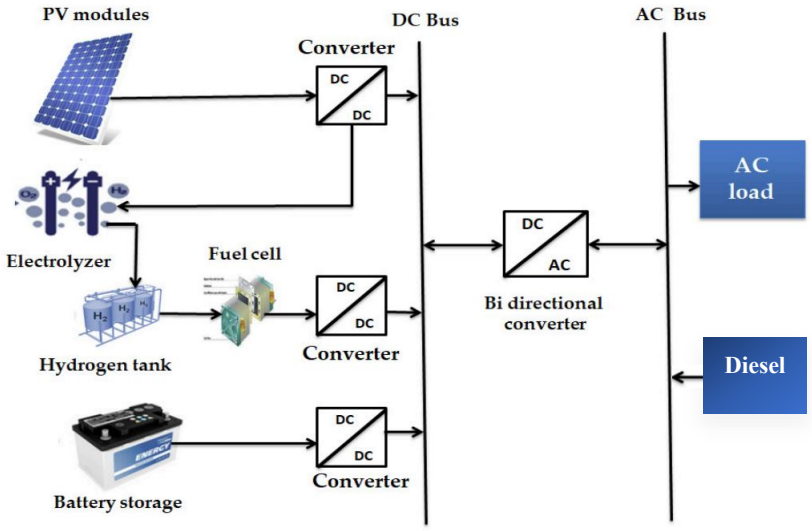


Gambar 2. 3 Sistem Smart *Microgrid*; Sistem AC (kiri), DC (kanan), dan Hybrid (bawah) (Shahgholian, 2021)

Sistem hybrid *Microgrid* menawarkan tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan sistem AC maupun DC murni. Keunggulan utamanya terletak pada

kemampuannya meminimalkan jumlah tahapan konversi energi, sehingga meningkatkan reliabilitas, mengurangi kebutuhan *interfacing device*, serta menekan biaya energi secara keseluruhan. Contoh skema konfigurasi hybrid *Microgrid* ditampilkan pada Gambar 2.21.

Dalam perancangannya, desain hybrid *Microgrid* umumnya dilakukan melalui pendekatan pemodelan terhadap setiap komponen yang akan diintegrasikan ke dalam sistem. Proses ini bertujuan untuk mengoptimalkan pembagian beban, menentukan kapasitas komponen yang sesuai, serta memperhitungkan kebutuhan investasi dan biaya operasional yang diperlukan agar sistem dapat berfungsi secara efisien dan ekonomis.



Gambar 2. 4 Konfigurasi Hybrid *Microgrid* (Diesel–PV–Baterai–Fuel Cell) (Uwineza *et al*., 2022)

2.1.2 Konsep Dedieselisasi

Dedieselisasi merupakan program strategis nasional yang berorientasi pada transformasi sistem ketenagalistrikan Indonesia dari ketergantungan terhadap pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) menuju sistem yang lebih berkelanjutan. Program ini muncul sebagai respons terhadap realitas geografis Indonesia sebagai negara

kepulauan, di mana pada masa awal pembangunan nasional, PLTD menjadi solusi rasional dan cepat untuk menyediakan akses listrik dasar di daerah-daerah terpencil yang secara teknis dan ekonomis sulit dijangkau oleh jaringan transmisi utama. Keberadaan ribuan unit PLTD tersebut pada masanya berhasil mewujudkan keadilan sosial melalui pemerataan akses energi, mengatasi keterbatasan infrastruktural, serta mencerahkan wilayah-wilayah yang sebelumnya gelap secara elektrikal.

Seiring dinamika pembangunan nasional, paradigma ketenagalistrikan mengalami evolusi signifikan. Posisi bahan bakar minyak (BBM) yang semula berfungsi sebagai *third line of defence* dalam penyediaan listrik di wilayah terisolir semakin terbebani oleh pertumbuhan ekonomi dan perkembangan daerah yang meningkatkan konsumsi energi secara eksponensial. Fakta bahwa pemenuhan kebutuhan BBM masih bergantung pada impor dengan volume yang terus meningkat setiap tahun menciptakan kerentanan ketahanan energi dan tekanan pada neraca perdagangan nasional. Oleh karena itu, transformasi strategi penyediaan listrik dari berbasis bahan bakar fosil menuju energi baru terbarukan (EBT) menjadi imperatif dalam kerangka pembangunan energi nasional yang berdaulat, mandiri, dan berkelanjutan.

Dalam operasionalisasinya, Program Dedieselisasi diimplementasikan melalui tiga pola utama yang saling bersinergi. Pertama, konversi PLTD menjadi pembangkit EBT dengan skema hybrid yang diintegrasikan dengan sistem penyimpanan energi baterai. Pola ini khususnya diterapkan pada sistem terisolasi (*isolated grid*) yang secara teknis tidak memungkinkan untuk diinterkoneksikan dengan jaringan utama. Berbagai teknologi EBT seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA), mikrohidro (PLTM/MH), surya (PLTS), bayu (PLTB), biomassa (PLTBm), biogas (PLTBg), arus laut (PLTAL), panas bumi (PLTP), dan sampah (PLTSa) diimplementasikan sesuai potensi lokal masing-masing wilayah. Konversi ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada BBM tetapi juga meningkatkan efisiensi biaya pembangkitan dan memperpanjang jam nyala (*operating hours*) sistem.

Kedua, program gasifikasi dan pengembangan pembangkit berbasis gas non-BBM. Implementasi pola ini memberikan manfaat ganda: (1) reduksi konsumsi BBM yang secara signifikan mengurangi beban impor, dan (2) transisi menuju energi yang lebih

bersih dengan emisi karbon yang lebih rendah sehingga lebih ramah lingkungan. Gas alam sebagai bahan bakar transisi (*transition fuel*) menawarkan fleksibilitas operasional yang lebih baik dibandingkan PLTD dengan dampak lingkungan yang lebih minimal.

Ketiga, interkoneksi sistem-sistem terisolasi ke jaringan utama (*grid*) sehingga operasional PLTD dapat dihentikan secara bertahap. Program ini merupakan langkah strategis yang tidak hanya bertujuan mengurangi konsumsi BBM tetapi juga meningkatkan keandalan dan kualitas pasokan listrik melalui integrasi dengan sistem yang lebih besar dan stabil. Dampak multiplier yang diharapkan meliputi peningkatan produktivitas ekonomi daerah, perluasan akses listrik 24 jam, dan percepatan pembangunan wilayah tertinggal.

Secara fundamental, Program Dedieselisasi memiliki tujuan multidimensional: mengurangi operasional pembangkit diesel di sistem kecil/terisolasi, menurunkan ketergantungan pada BBM impor, meningkatkan porsi EBT dalam bauran energi nasional, serta mendorong pertumbuhan ekonomi inklusif di daerah terpencil melalui ketersediaan energi yang andal dan berkelanjutan. Program ini merepresentasikan komitmen Indonesia dalam menjalankan transisi energi yang selaras dengan target pembangunan berkelanjutan (SDGs) dan komitmen iklim global, sekaligus memperkuat ketahanan energi nasional dalam jangka panjang.

2.1.3 Peluang dan Tantangan *Microgrid* di Kepulauan

Penerapan *Microgrid* di wilayah kepulauan menawarkan peluang besar untuk kemandirian energi, namun dihadapkan pada tantangan multidimensional yang unik (Sulaeman, I. at el. 2021). Berbeda dengan sistem di daratan utama (*mainland*), pulau-pulau kecil memiliki karakteristik geografis dan sosial yang membatasi fleksibilitas operasional sistem tenaga listrik (Miao, H., *et al*. 2023).

2.1.3.1 Isu Spesifik dan Tantangan Teknis

1. Logistik Bahan Bakar dan Biaya Operasional

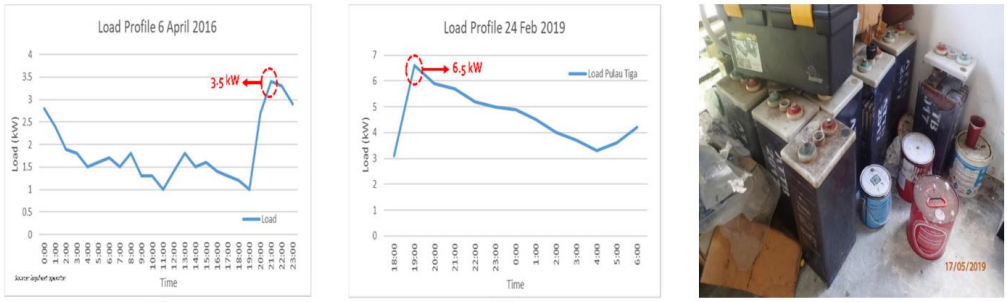
   Mayoritas pulau kecil secara historis bergantung sepenuhnya pada Generator Diesel (DG) (Miao, H., *et al*. 2023). Ketergantungan ini menimbulkan masalah logistik yang signifikan karena pengiriman bahan bakar fosil ke lokasi terpencil memakan waktu lama, berbiaya tinggi, dan berisiko tinggi terhadap pencemaran lingkungan akibat kebocoran selama transportasi laut (Costa, T. S., & Villalva, M. G. 2020). Biaya produksi listrik di pulau terpencil bahkan dilaporkan bisa mencapai dua puluh kali lipat dibandingkan tarif di daratan utama (Miao, H., *et al*. 2023).

2. Intermitensi Sumber Energi Terbarukan (RES)

   Pulau-pulau biasanya kaya akan sumber daya angin dan surya, namun sifatnya yang intermiten dan stokastik (tidak menentu) menjadi tantangan utama bagi stabilitas jaringan mandiri (*islanded*) (Ishraque, M. F., *et al*. 2021). Fluktuasi mendadak pada kecepatan angin atau iradiasi matahari dapat menyebabkan ketidakseimbangan instan antara pasokan dan permintaan, yang berujung pada deviasi frekuensi dan tegangan yang drastis karena rendahnya inersia sistem pada *Microgrid* kecil (El-Bidairi, K. S., *et al*. 2020).

3. Kebutuhan Sistem Penyimpanan Energi (ESS)

   Untuk mengatasi intermitensi RES, integrasi sistem penyimpanan energi seperti baterai (BESS) atau hidrogen menjadi mutlak diperlukan guna menjamin kontinuitas pasokan (Żołądek, M., *et al*. 2022). Namun, kapasitas baterai yang tidak memadai dapat memperburuk kinerja sistem, sementara ukuran yang terlalu besar akan meningkatkan biaya investasi (*Capital Expenditure*) secara signifikan (El-Bidairi, K. S., *et al*. 2020).



(a) (b) (c)

Gambar 2. 5 Profil beban mikrogid PLTS pada lokasi 1 untuk periode: (a) tahun 2016; (b) tahun 2019; dan (c) kondisi baterai rusak

4. Keterbatasan Lahan (*Land-use Constraints*)

   Kepulauan seringkali memiliki keterbatasan lahan yang ekstrem, di mana sebagian besar area mungkin merupakan pemukiman padat atau cagar alam yang dilindungi. Pemasangan panel surya skala besar atau turbin angin memerlukan luasan area tertentu yang sering kali berbenturan dengan kebijakan konservasi lingkungan atau penggunaan lahan produktif masyarakat (Gomes, J. G., *et al*. 2021).

2.1.3.2 Tantangan Sosial dan Kelembagaan

1. Status Lahan dan Konflik Sosial

   Salah satu hambatan utama di Indonesia adalah ketidakjelasan status kepemilikan lahan, terutama lahan warisan yang tidak memiliki dokumentasi hukum formal. Hal ini sering memicu sengketa lahan selama fase perencanaan dan implementasi. Selain itu, kurangnya keterlibatan sosial dapat memicu tindakan vandalisme terhadap aset *Microgrid*, seperti perusakan panel surya akibat konflik internal masyarakat (Sulaeman, I. at el. 2021).

Tabel 2. 1 Tantangan keberlanjutan dan penskalaan multi-dimensi dalam pengembangan mikrogid di daerah terpencil yang relevan untuk Indonesia

No	Potensi Tantangan	Dampak yang Mungkin Terjadi
Institusional		
In1	Ketidakselarasan antara institusi pusat dan daerah	Pembangunan tidak mencerminkan kebutuhan pengguna, kurangnya partisipasi lokal, bertentangan dengan rencana pembangunan, pengabaian PLTS *off-grid* atau hibrida PLTS *off-grid*.
In2	Alokasi tanggung jawab yang tidak jelas	Tumpang tindih tugas antar pemangku kepentingan, kurangnya koordinasi, masyarakat tidak merasa memiliki dan bertanggung jawab. Hal ini menyebabkan keterbatasan anggaran O&M, penggantian, dan biaya variabel lainnya.
In3	Penegakan otoritas formal yang tidak stabil dan lemah	Kesulitan dalam melakukan klaim garansi, penalti yang tidak mengikat, insentif yang tidak terealisasi, koneksi lebih diutamakan daripada regulasi.
Sosial		
So1	Kurangnya keterlibatan sosial dan kesadaran teknologi	Penerimaan sosial yang rendah, rasa tidak aman (vandalisme/pencurian), konsumsi energi yang boros.
So2	Status lahan yang tidak jelas	Sengketa, luas area yang tidak mencukupi, penggunaan lahan yang tidak sesuai, perizinan yang sulit.
Teknis		
Te1	Kurangnya pengetahuan praktis dan teknis serta survei pendahuluan yang tidak memadai	Karakterisasi beban yang salah, penentuan ukuran peralatan yang tidak tepat, kerugian sistem yang tinggi, masa pakai sistem yang lebih pendek. Ketidaksesuaian pasokan/permintaan yang tinggi

		mengakibatkan pemangkasan daya (*curtailment*) atau defisit energi.
Te2	Kurangnya personel ahli lokal atau keahlian teknis	Penggunaan material yang tidak bersertifikat atau berkualitas rendah, penggunaan komponen yang salah, jaminan kualitas dan implementasi yang buruk. Biaya tambahan untuk tenaga ahli asing.
Te3	Kurangnya standar O&M (Operasi dan Pemeliharaan)	Praktik O&M yang tidak tepat atau tidak efisien, kurangnya alat ukur untuk pemecahan masalah, waktu yang lebih lama untuk pemeliharaan korektif, masa pakai komponen yang lebih pendek.
Te4	Masalah kualitas daya	Meningkatnya kerugian (*losses*), trip palsu, kesalahan komunikasi peralatan.
Ekonomi		
Ec1	Kurangnya kerangka kerja keuangan	Kurangnya model bisnis yang menarik, investasi yang tidak pasti.
Ec2	Investasi awal dan biaya penggantian yang tinggi, kurangnya dukungan finansial	Biaya produksi listrik tinggi; hal ini menyebabkan pengembalian investasi tidak menarik karena tarif diatur dan kemungkinan besar lebih rendah dari biaya produksi.
Ec3	Kurangnya pemanfaatan energi secara produktif	Listrik tidak meningkatkan pendapatan pengguna, kurangnya pendapatan karena permintaan yang rendah.
Lingkungan		
En1	Penilaian sumber daya yang tidak lengkap	Pemilihan sumber daya yang kurang optimal.
En2	Kesadaran lingkungan yang rendah	Praktik pembuangan limbah yang tidak tepat, biaya lingkungan yang diremehkan.

En3	Masalah vegetasi yang tidak terkendali, hewan pengerat, serangga, dan kadal/cicak	Meningkatkan risiko kegagalan dan kebutuhan akan penyegelan yang rapat untuk peralatan, saluran (*ducts*), dan rak kabel.
En4	Kesesuaian komponen terhadap lingkungan yang relatif lembap dan bersuhu tinggi	Meningkatkan laju degradasi peralatan jika tidak dikondisikan dengan benar.
En5	Ketersediaan lahan, perubahan tata guna lahan, dan pembukaan lahan	Risiko pengalihan dan pengurangan lahan produktif, mengganggu ekosistem di kawasan konservasi.
Kebijakan		
Po1	Kemauan politik (*political will*) yang tidak memadai	Kurangnya kehadiran mikrogid dalam perencanaan energi, anggaran pengembangan yang terbatas, inisiatif kebijakan yang tidak efektif, dan kontrol kualitas yang tidak efektif.
Po2	Perubahan regulasi dan standar	Regulasi tidak mendukung target, kurangnya standar yang jelas (menurunkankualitas, meningkatkn biaya).
Po3	Kerangka kerja yang tidak efektif untuk menstimulasi sektor swasta	Pengembalian investasi yang tidak menarik, yang menyebabkan sedikit peserta yang berminat.

Sumber: Sulaeman, I., *et al*. (2021)

2. Kapasitas Sumber Daya Manusia Lokal

Operasi dan pemeliharaan (O&M) *Microgrid* hibrida yang canggih memerlukan keahlian teknis tinggi. Di banyak pulau kecil, terdapat kelangkaan personel ahli, sehingga ketika terjadi kegagalan sistem (seperti kerusakan *inverter* atau degradasi baterai), waktu pemulihan (*downtime*) menjadi sangat lama karena harus menunggu teknisi dari luar daerah (Simatupang, D., *et al*. 2021).



(a) (b) (c)

Gambar 2. 6 Kondisi fisik lokasi PLTS yang terbengkalai: (a) panel surya yang tertutup vegetasi; (b) kondisi kotak penyambung (*junction box*); (c) tampak luar rumah pembangkit (*powerhouse*)

2.1.3.3 Peluang Pengembangan

Meskipun tantangannya besar, *Microgrid* kepulauan memberikan peluang emas untuk:

1. Dedieselisasi mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi karbon secara drastis melalui pemanfaatan energi lokal (Prawitasari, A., *et al*. 2024).
2. Meningkatkan kemampuan komunitas untuk bertahan dan pulih dari gangguan jaringan pusat atau bencana alam melalui pembangkitan lokal yang otonom (Miao, H., *et al*. 2023).
3. Akses listrik 24 jam terbukti dapat mendorong pertumbuhan ekonomi lokal di wilayah 3T (Tertinggal, Terdepan, Terluar), meskipun peramalan beban yang akurat tetap menjadi kunci agar sistem tidak mengalami kelebihan beban (*overload*) (Sulaeman, I. at el 2021).

No	Planning				Design and Implementation				Operation and Maintenance		
	Prospecting and Site Selection	Resource Assessment	Demand Projection	Financial Modeling	Environment Impact Assessment	Technical Design and Technology Selection	Pre-Installation	Installation and Commissioning	Monitoring and Evaluation	Scheduled or Preventive	Unscheduled
In1	CA, RQ		CA								
In2				Ad					RQ	RQ	RQ
In3					Ad			RQ			RQ
So1			CA				Au				
So2	CA			Ad							
Te1		CA	CA, Ad			CA, RQ	RQ	RQ			
Te2						RQ, Ad	RQ	RQ	RQ	RQ	RQ, Ad
Te3									RQ	RQ	RQ, Ad
Te4						RQ, Ad		RQ			
Ec1				CA, Ad							
Ec2				CA, Ad							
Ec3							Au				
En1		Ad									
En2					Ad						
En3						RQ, Ad				RQ	
En4						RQ, Ad				RQ	
En5					CA						
Po1	CA			Ad							
Po2											
Po3				Ad							

Gambar 2. 7 Potensi tantangan penskalaan dan keberlanjutan serta dampaknya terhadap atribut akses energi pada setiap fase pengembangan (Sulaeman, I. at el 2021)

Keterangan Kode: Tantangan: Institusional (In), Sosial (So), Teknis (Te), Ekonomi (Ec), Lingkungan (En), Kebijakan (Po). Atribut Akses Energi: Kapasitas dan ketersediaan (CA), keandalan dan kualitas (RQ), keterjangkauan bagi pengembang (Ad), dan keterjangkauan bagi pengguna (Au).

2.2 Kajian Keekonomian Sistem Microgrid Energi

2.2.1 Parameter Ekonomi Proyek Pembangkit

Analisis kelayakan tekno-ekonomi pada sistem *Microgrid* hibrida memerlukan pemodelan parameter finansial yang sangat teliti guna mencerminkan biaya siklus hidup proyek yang sebenarnya di lapangan. Parameter ekonomi dasar menjadi masukan vital bagi algoritma optimasi untuk menentukan konfigurasi sistem yang paling hemat biaya (*cost-effective*) dan kompetitif dibandingkan sumber energi konvensional (Odetoye *et al*., 2023). Ketidakakuratan dalam mendefinisikan biaya awal maupun asumsi ekonomi

makro dapat menyebabkan deviasi signifikan pada indikator performa utama seperti *Net Present Cost* (NPC) dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) (Nallainathan *et al*., 2025).

Kajian mengenai parameter ekonomi dalam sektor energi di Indonesia menunjukkan bahwa konsumsi listrik, khususnya pada sektor industri dan bisnis, memiliki pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan investasi dan Produk Domestik Bruto (PDB). Berdasarkan penelitian Adi *et al*. (2022), terdapat keterkaitan yang erat antara konsumsi energi produktif dengan harga listrik dan kondisi makroekonomi seperti inflasi dan tingkat suku bunga di Indonesia. Hal ini menegaskan bahwa dalam merencanakan optimalisasi sistem energi hibrida seperti *microgrid*, pertimbangan terhadap variabel ekonomi makro dan profil konsumsi sektor bisnis menjadi krusial untuk menjamin keberlanjutan investasi jangka panjang.

2.2.1.1 Pengeluaran Modal (Capital Expenditure - CAPEX)

CAPEX mencakup seluruh investasi awal yang diperlukan untuk pengadaan komponen fisik, biaya perizinan, logistik pengiriman ke lokasi terpencil, serta biaya instalasi dan komisioning sistem. Dalam sistem hibrida, CAPEX bersifat padat modal karena melibatkan integrasi berbagai teknologi seperti panel surya (PV), turbin angin (WT), dan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) (Sakthivelnathan *et al*., 2024). Struktur biaya ini sangat bergantung pada kapasitas terpasang dan kualitas perangkat yang dipilih. Estimasi biaya investasi awal per unit kapasitas untuk setiap teknologi ini dapat dirujuk pada Gambar 2.8 yang merinci alokasi biaya modal untuk PV, angin, BESS, hingga biaya untuk pengurangan tingkat kegagalan peralatan guna meningkatkan keandalan. Untuk referensi biaya modal per kW untuk PV, BESS, dan Diesel Generator dapat dilihat pada Gambar 2.9.

	Investment cost of 1 MW of PV (M $)	Investment cost of 1 MW of WT (M$)	Investment cost of x MWh of BESS (M$)	Investment cost of 50 kW of DR (M$)	Investment reduction of 0.01 failure rate (M$)
Total cost	1	1.5	0.5	0.55	2.5

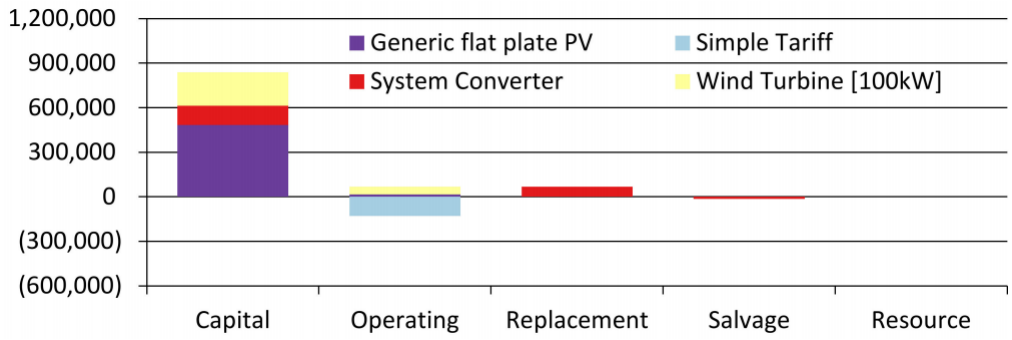
Gambar 2. 8 Ringkasan biaya investasi (Sakthivelnathan, N., *et al*. 2024)

	Solar PV	Converter	BESS	Diesel Generator	EV charger
Capacity	1 kW	1 kW	1 kWh	1 kW	
Capital cost	$780	$450	$850	$800	$8000 per charger
Replacement	$700	$400	$750	$800	$7500 per charger
O&M	$250 per year	$50 per year	$100 per year	$250 per year	$250 per charger per year
Fuel cost	–-			$2.10 per litre	–-
Charger type	–-				deferrable office EV charger
Vehicle type	–-				Small/ medium EVs (> 40kWh capacity)
Charger output power (maximum)	–-				22 kW
No. of chargers	–-				6 (three-phase AC chargers)

Gambar 2. 9 Asumsi dan data input untuk permodelan sistem (Baniya *et al*. 2024)

2.2.1.2 Pengeluaran Operasional (Operational Expenditure - OPEX)

OPEX terdiri dari biaya rutin tahunan yang dikeluarkan sepanjang masa proyek untuk memastikan sistem beroperasi sesuai spesifikasi teknis, termasuk biaya pemeliharaan rutin (*O&M*), perbaikan minor, dan gaji operator. Komponen penting lainnya dalam kategori ini adalah biaya penggantian (*replacement cost*) untuk perangkat yang memiliki umur teknis lebih pendek dari umur proyek, seperti baterai atau inverter (Ishraque *et al*., 2021). Sebagai contoh, sementara proyek direncanakan selama 25 tahun, baterai litium umumnya memerlukan penggantian pada tahun ke-13 (Sakthivelnathan *et al*., 2024). Perbandingan proporsi antara pengeluaran modal awal dengan total biaya operasional dan penggantian selama masa proyek divisualisasikan dalam Gambar 2.10 yang mengilustrasikan kontribusi biaya *Capital, Operating, Replacement,* dan *Salvage* terhadap total biaya sistem.



Gambar 2. 10 Ringkasan biaya komponen proyek (Riayatsyah, T. M. I., *et al*. 2022)

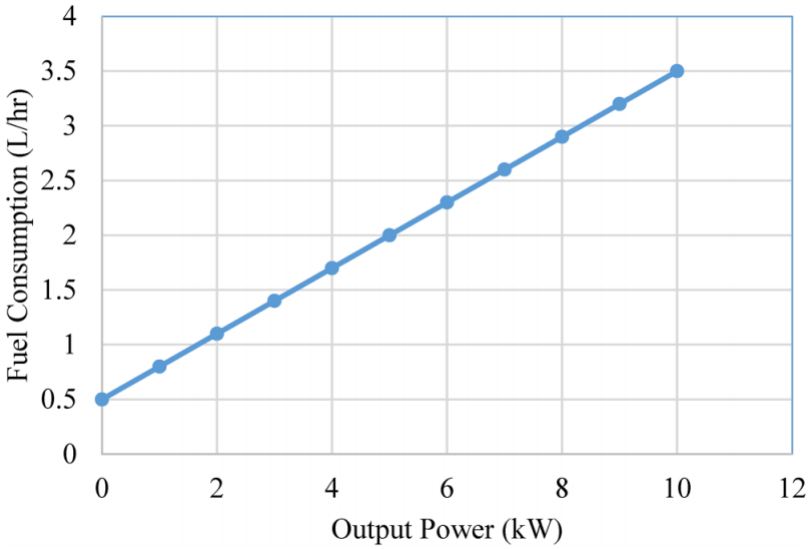
2.2.1.3 Biaya Bahan Bakar (Fuel Cost) dan Efisiensi Generator

Bagi *Microgrid* yang masih mengintegrasikan generator diesel sebagai cadangan, biaya bahan bakar merupakan komponen OPEX yang paling volatil dan dominan (Omar *et al*., 2024). Di wilayah kepulauan, harga bahan bakar sering kali jauh lebih tinggi dibandingkan harga pasar karena adanya beban logistik transportasi laut dan risiko tumpahan lingkungan. Selain harga per liter, total pengeluaran bahan bakar sangat dipengaruhi oleh kurva efisiensi generator; generator diesel yang beroperasi pada beban rendah (di bawah 30-40%) akan mengalami penurunan efisiensi drastis dan peningkatan konsumsi bahan bakar spesifik (Simatupang *et al*., 2021). Parameter teknis dan biaya terkait generator diesel diringkas dalam Gambar 2.11 yang yang merinci harga bahan bakar ($1.05/L), biaya O&M per jam operasi, serta batas beban minimum.

Factors	Value
Initial capital	$300/kW
Replacement	$200/kW
O&M (per op. hour)	$0.03/kW
Lifetime	15 000 h
Fuel cost	$1.05/L
Min load ratio	25%

Gambar 2. 11 Spesifikasi teknis dan ekonomi generator diesel (Ishraque, M. F., *et al*. 2021)

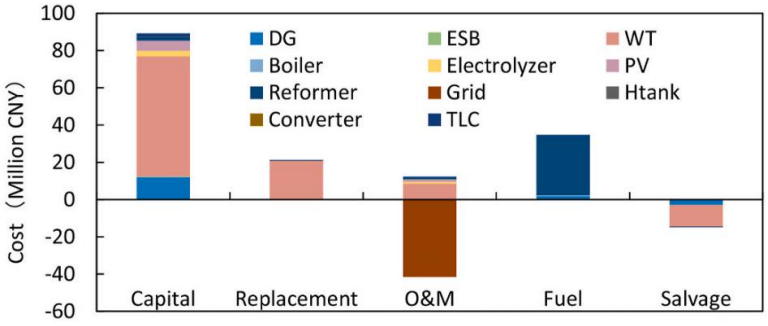
Pada Gambar 2.12 menunjukkan hubungan linear antara konsumsi bahan bakar dengan keluaran daya generator.



Gambar 2. 12 Hubungan antara daya keluaran terhadap konsumsi bahan bakar generator (Ishraque, M. F., *et al*. 2021)

2.2.1.4 Umur Proyek (Project Lifetime) dan Nilai Residu (Salvage Value)

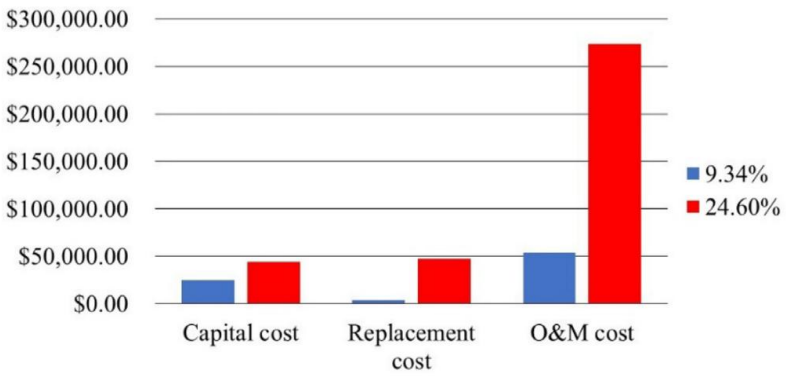
Analisis ekonomi *Microgrid* umumnya menggunakan horizon waktu operasional antara 20 hingga 25 tahun (Mas'ud *et al*., 2021). Di akhir periode proyek, beberapa aset yang baru diganti atau memiliki umur teknis panjang mungkin masih memiliki nilai sisa yang disebut *salvage value*. Nilai residu ini dihitung berdasarkan porsi umur teknis yang tersisa dan bertindak sebagai pengurang dari total biaya sistem (NPC) (Miao *et al*., 2023). Proporsi nilai sisa dibandingkan total biaya komponen dapat dilihat pada Gambar 2.13 yang menunjukkan bagaimana nilai *salvage* (nilai negatif pada grafik biaya) memberikan pengurang terhadap total pengeluaran sistem di akhir proyek..



Gambar 2. 13 Perbandingan distribusi biaya investasi, operasional, dan nilai sisa sistem (Miao, H., *et al*. 2023)

2.2.1.5 Tingkat Diskon (Discount Rate), Inflasi, dan Eskalasi Biaya

Tingkat diskon nominal dan riil digunakan untuk mengompensasi nilai waktu dari uang (*time value of money*), yang mengubah arus kas masa depan ke nilai saat ini. Dalam ekonomi yang tidak stabil, tingkat inflasi memiliki dampak destruktif terhadap kelayakan finansial karena dapat membengkakkan biaya O&M dan penggantian secara eksponensial selama 25 tahun (Chisale *et al*., 2023). Lonjakan biaya akibat inflasi tinggi sangat memengaruhi periode pengembalian modal (*payback period*) proyek, sebagaimana ditunjukkan dalam analisis sensitivitas Gambar 2.14 yang memperlihatkan peningkatan tajam pada biaya O&M dan penggantian saat tingkat inflasi naik dari 9,34% menjadi 24,6%.



Gambar 2. 14 Perbandingan dampak tingkat inflasi terhadap kinerja keuangan desain sistem (Chisale, S. W., *et al*. 2023)

2.2.1.6 Harga Jual Listrik (Tarif) dan Pendapatan Proyek

Pendapatan proyek diperoleh dari penjualan listrik berdasarkan tarif yang ditetapkan. Beberapa model manajemen energi modern mempertimbangkan strategi harga dinamis seperti *Time-of-Use* (ToU) atau *Real-Time Pricing* (RTP) untuk mengoptimalkan penggunaan baterai dan memaksimalkan keuntungan ekonomi (Amer *et al*., 2024). Di daerah terpencil, tarif sering kali disubsidi agar tetap terjangkau oleh masyarakat, namun perhitungan harga jual riil tetap diperlukan untuk menilai kebutuhan subsidi pemerintah atau ROI bagi pengembang swasta (Omar *et al*., 2024). Perbandingan dampak skema harga ini terhadap biaya sistem dirangkum dalam Gambar 2.15 yang membandingkan performa finansial antara skema harga RTP, ToU, dan *one-spike pricing*

Costs ($/day)	Electricity pricing schemes		
	RTP	ToU	One-spike
Grid cost	1379	1493	1798
ESS cost	1384	1498	1281
DG cost	1166	1380	985
Total system cost	3929	4371	4064

Gambar 2. 15 Perbandingan biaya sistem berdasarkan berbagai skema tarif listrik harian (Amer, A., *et al*. 2024)

2.2.2 Metode Analisis Kelayakan Investasi

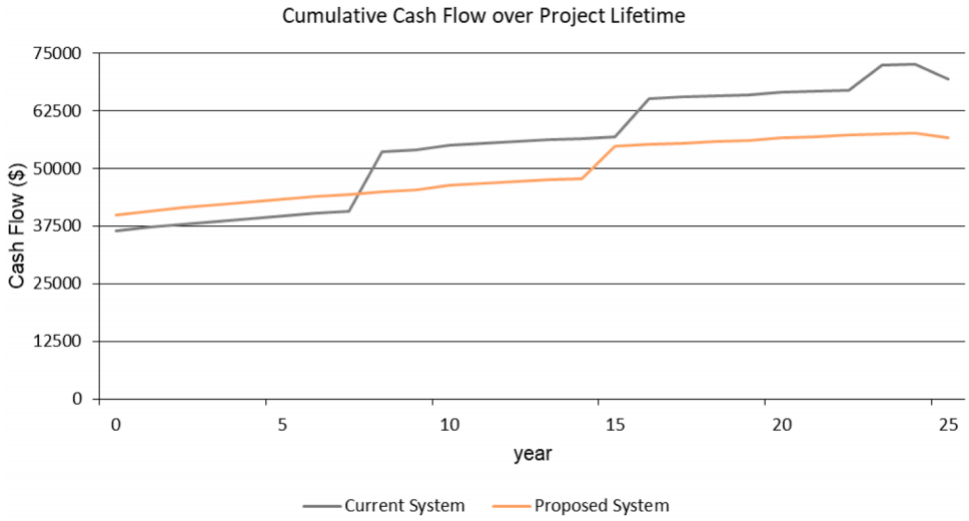
Analisis kelayakan investasi merupakan instrumen krusial dalam mengevaluasi keberlanjutan ekonomi sistem *Microgrid* hibrida untuk memastikan bahwa proyek tersebut tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga menguntungkan secara finansial (Abirami *et al*., 2025; Odetoye *et al*., 2023). Penggunaan metrik ekonomi yang terstandarisasi memungkinkan pengembang untuk membandingkan berbagai konfigurasi teknologi terbarukan dengan sistem konvensional berbasis bahan bakar fosil guna mencapai bauran energi yang paling kompetitif (Abirami *et al*., 2025; Ajiboye *et al*., 2023).

2.2.2.1 Net Present Value (NPV) dan Net Present Cost (NPC)

Net Present Value (NPV) digunakan untuk menilai profitabilitas investasi dengan menghitung selisih antara nilai kini dari arus kas masuk dengan arus kas keluar selama umur proyek (Abirami *et al*., 2025). Dalam analisis *Microgrid*, NPV yang positif menunjukkan bahwa proyek tersebut layak secara finansial karena mampu menghasilkan pendapatan yang melebihi biaya investasi dan operasional (Abirami *et al*., 2025; Hossain *et al*., 2025). Persamaan matematis untuk NPV dirumuskan sebagai berikut (Abirami *et al*., 2025):

$$NPV = \sum_{t=1}^{T} \frac{R_t}{(1+r)^t} - C_{\text{total}} \tag{2.1}$$

Di mana R_t adalah pendapatan pada tahun t, r adalah tingkat diskon (*discount rate*), C_{total} adalah total biaya modal awal, dan T adalah umur proyek (Abirami *et al*., 2025). Sementara itu, dalam simulasi menggunakan perangkat lunak seperti HOMER, istilah *Net Present Cost* (NPC) sering digunakan untuk merepresentasikan total biaya siklus hidup sistem, yang mencakup CAPEX, OPEX, biaya penggantian, dan biaya bahan bakar, dikurangi nilai residu aset di akhir proyek (Jahed *et al*., 2024; Riayatsyah *et al*., 2022). Akurasi perhitungan NPC sangat bergantung pada *Capital Recovery Factor* (CRF) untuk mengonversi biaya tahunan menjadi nilai sekarang (Ishraque *et al*., 2021; Mas'ud *et al*., 2021). Pergerakan arus kas kumulatif ini dapat dilihat pada Gambar 2.16 yang menunjukkan perbandingan akumulasi kas antara sistem eksisting dengan sistem usulan selama 25 tahun.



Gambar 2. 16 Aliran kas siklus hidup proyek (Hossain *et al*. 2025)

2.2.2.2 Internal Rate of Return (IRR)

Internal Rate of Return (IRR) didefinisikan sebagai tingkat diskon yang membuat nilai NPV proyek menjadi nol (Riayatsyah *et al*., 2022). Metrik ini mencerminkan efisiensi investasi dan digunakan sebagai ambang batas profitabilitas; proyek dianggap layak jika IRR yang dihasilkan lebih tinggi daripada tingkat pengembalian minimum yang disyaratkan atau *cost of capital* (Abirami *et al*., 2025; Sakthivelnathan *et al*., 2024). Nilai IRR yang tinggi, misalnya mencapai 23,7% pada integrasi energi angin, menunjukkan potensi pengembalian modal yang kuat bagi investor (Hossain *et al*., 2025).

$$\sum_{t=1}^{T} \frac{R_t}{(1+IRR)^t} - C_{total} = 0 \quad (2.2)$$

di mana:

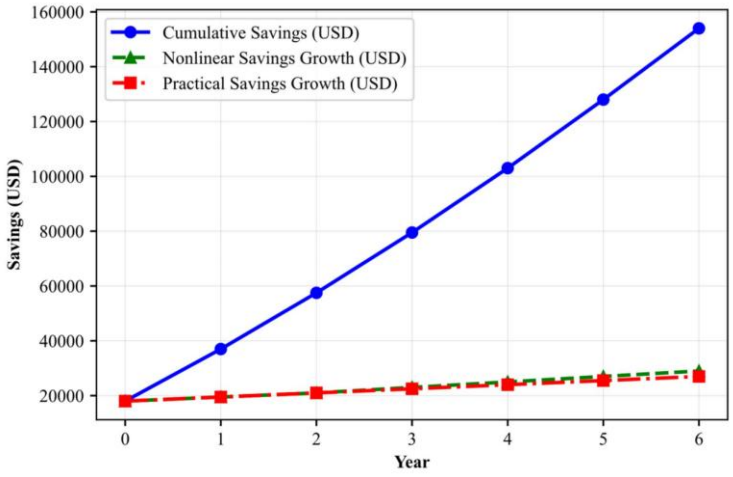
- R_t = arus kas bersih pada tahun ke-t
- C_{total} = investasi awal
- T = umur proyek

2.2.2.3 Payback Period (PBP)

Payback Period mengukur durasi waktu yang dibutuhkan oleh sebuah sistem energi untuk memulihkan modal investasi awal melalui penghematan biaya operasional atau pendapatan dari penjualan listrik (Abirami *et al*., 2025; Żołądek *et al*., 2022). Periode pengembalian modal yang lebih singkat sangat disukai karena mengurangi risiko investasi dan mempercepat fase perolehan keuntungan bersih (Abirami *et al*., 2025). Rumus sederhana untuk menghitung *payback period* adalah (Abirami *et al*., 2025; Hossain *et al*., 2025):

$$T_{\text{payback}} = \frac{C_{\text{total}}}{R_{\text{annual}} - C_{\text{annual}}} \tag{2.3}$$

Di mana C_{total} adalah investasi modal awal, R_{annual} adalah pendapatan tahunan, dan C_{annual} adalah biaya operasional tahunan (Abirami *et al*., 2025). Tren penurunan periode pengembalian modal seiring dengan peningkatan efisiensi sistem dapat diilustrasikan pada Gambar 2.17 yang menampilkan grafik hubungan antara investasi awal, akumulasi penghematan, dan titik impas investasi selama periode 6 tahun.



Gambar 2. 17 Analisis ekonomi sistem energi terbarukan hibrida, yang menunjukkan periode pengembalian modal (*payback period*) selama 6 tahun (Abirami *et al*. 2025)

2.2.2.4 Levelized Cost of Energy (LCOE)

Levelized Cost of Energy (LCOE) merupakan indikator ekonomi paling vital yang mengukur biaya rata-rata per kWh listrik yang dihasilkan oleh sistem selama seluruh masa pakai operasionalnya (Abirami *et al*., 2025; Odetoye *et al*., 2023). LCOE memungkinkan perbandingan langsung antara berbagai teknologi pembangkitan dengan menyamaratakan seluruh biaya investasi dan biaya rutin terhadap total produksi energi (Odetoye *et al*., 2023; Riayatsyah *et al*., 2022). Formulasi standar LCOE yang digunakan dalam analisis *Microgrid* adalah (Ishraque *et al*., 2021; Miao *et al*., 2023):

$$LCOE = \frac{C_{\text{annual,tot}}}{E_{\text{prim}} + E_{\text{grid,sales}} + E_{\text{def}}} \tag{2.4}$$

Di mana $C_{\text{annual,tot}}$ adalah total biaya tahunan sistem, E_{prim} adalah beban primer yang dilayani, $E_{\text{grid,sales}}$ adalah energi yang dijual ke jala-jala, dan E_{def} adalah beban yang dapat ditunda (*deferrable load*) (Ishraque *et al*., 2021). Nilai LCOE yang rendah menunjukkan bahwa sistem tersebut sangat kompetitif; sebagai contoh, sistem hibrida terbarukan mampu mencapai LCOE sebesar $0,085/kWh dibandingkan sistem diesel yang dapat mencapai lebih dari $1,01/kWh di lokasi terpencil (Abirami *et al*., 2025; Odetoye *et al*., 2023). Data perbandingan biaya unit energi antar komponen ini dapat dirangkum melalui Gambar 2.18 yang menyajikan data LCOE untuk turbin angin, panel surya, dan baterai dalam satu tabel perbandingan.

System Component	Rated Capacity	Annual Production	Capital Cost	Annual Maintenance Cost	Energy Output (kWh/yr)	Energy Input (kWh/yr)	Total Losses (kWh/yr)	Autonomy (*hrs*)	LCOE ($/kWh)	Capacity Factor (%)
Wind Turbine	3.30 kW	5787 kWh/yr	$15,000	$250/yr	5787 kWh/yr	1513 kWh/yr	106 kWh/yr	21.2 *hrs*	$0.0256/kWh	8.18 %
PV System	5.56 kW	8533 kWh/yr	$2222	$46.3/yr	8533 kWh/yr	N/A	N/A	N/A	$0.0256/kWh	207 %
Battery Storage	12.5 kWh	1001 kWh/yr	$21,600	$400/yr	1001 kWh/yr	N/A	224 kWh/yr	21.2 *hrs*	N/A	N/A
Converter	1.96 kW	1407 kWh/yr	N/A	N/A	1407 kWh/yr	1513 kWh/yr	106 kWh/yr	N/A	N/A	8.18 %

Gambar 2. 18 Konfigurasi Sistem dan Hasil Analisis Kinerja Simulasi HOMER Pro (Hossain *et al*. 2025)

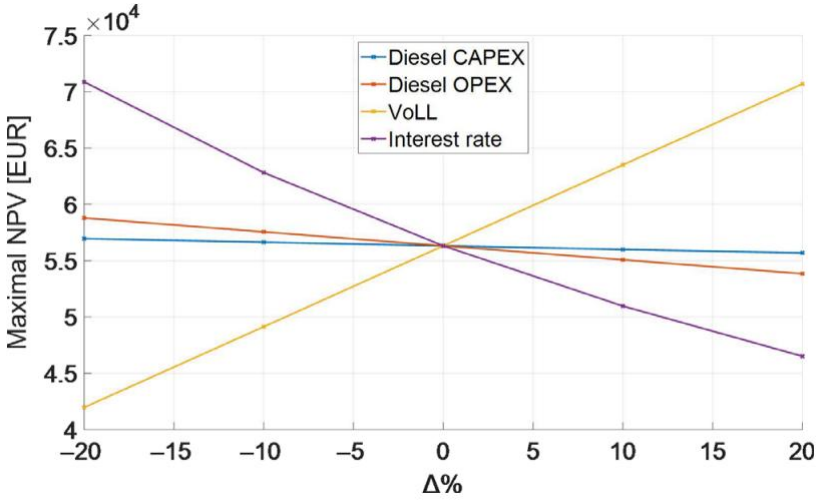
2.2.3 Analisis Sensitivitas dan Risiko

Analisis sensitivitas merupakan instrumen krusial dalam perencanaan *Microgrid* untuk mengevaluasi bagaimana perubahan pada parameter masukan tertentu dapat memengaruhi luaran optimasi dan indikator kelayakan finansial (Miao *et al*., 2023; Khan *et al*., 2025). Mengingat masa pakai proyek yang mencapai 20 hingga 25 tahun, ketidakpastian pasar dan variabilitas sumber daya alam menjadi risiko yang harus dimodelkan guna memastikan kekokohan (*robustness*) desain sistem hibrida (Ishraque *et al*., 2021; Nallainathan *et al*., 2025).

2.2.3.1 Pengaruh Fluktuasi Harga Bahan Bakar Minyak (BBM)

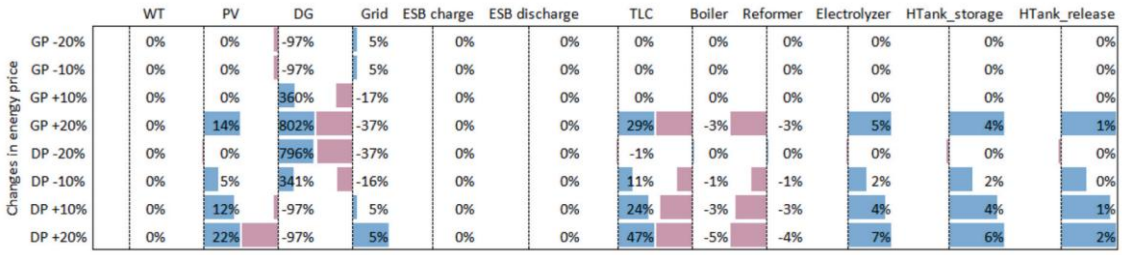
Harga diesel merupakan variabel yang paling volatil dalam operasional *Microgrid* di wilayah terpencil, di mana kenaikan harga BBM secara langsung meningkatkan biaya operasional tahunan dan *Net Present Cost* (NPC) secara signifikan (Omar *et al*., 2024; Odetoye *et al*., 2023). Analisis menunjukkan adanya hubungan terbalik antara harga diesel dengan pemanfaatan energi terbarukan; ketika harga diesel meningkat sebesar 10%, konsumsi bahan bakar total cenderung menurun (sekitar 7,62%) karena sistem akan secara otomatis meningkatkan penetrasi panel surya (PV) hingga 12% guna menjaga efisiensi biaya (Miao *et al*., 2023). Dampak kenaikan harga bahan bakar terhadap strategi operasional generator dapat divisualisasikan dalam Gambar 2.19 yang menunjukkan sensitivitas nilai NPV terhadap perubahan biaya operasional diesel.

Ketidakpastian harga energi primer di pasar internasional merupakan faktor risiko utama yang memengaruhi kinerja keuangan perusahaan di sektor energi di Indonesia. Penelitian Adi (2022) mengungkapkan bahwa variabilitas harga minyak mentah dunia memiliki efek domino terhadap harga gas dan permintaan energi lainnya, yang secara langsung berdampak pada pendapatan penjualan dan peningkatan risiko bisnis perusahaan (*Enterprise Risk*). Dalam konteks sistem *microgrid* di Pulau Bunaken yang secara teknis masih mengandalkan PLTD, fluktuasi harga minyak internasional ini menjadi variabel sensitivitas yang sangat menentukan kelayakan ekonomi skenario dedieselisasi dan strategi mitigasi risiko finansial proyek



Gambar 2. 19 Analisis sensitivitas generator diesel (Hartmann *et al*. 2021)

Selain itu pada Gambar 2.20 kita dapat melihat pergeseran bauran energi akibat perubahan harga diesel (DP)



Gambar 2. 20 Perubahan output komponen berdasarkan harga energi (Miao *et al*. 2023)

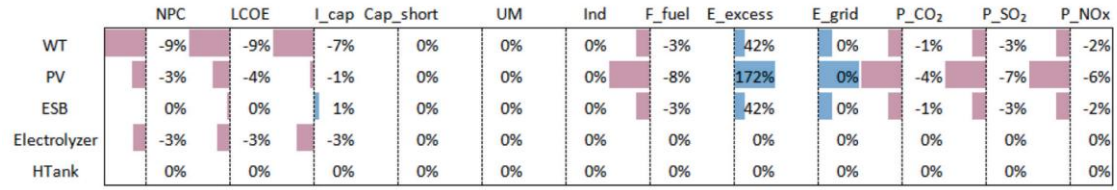
2.2.3.2 Pengaruh Suku Bunga dan Kondisi Ekonomi Makro

Suku bunga atau tingkat diskon (*discount rate*) memainkan peran dominan dalam menentukan daya saing biaya antara sistem hibrida terbarukan dengan pembangkit diesel konvensional (Jahed *et al*., 2024). Pada tingkat diskon yang rendah, sistem hibrida sering kali jauh lebih unggul, namun ketika suku bunga meningkat, biaya modal yang tinggi di awal proyek menjadi beban yang lebih berat, sehingga dapat memperpanjang periode

pengembalian modal (*payback period*) (Jahed *et al*., 2024; Sakthivelnathan *et al*., 2024). Selain itu, lonjakan inflasi yang tidak terduga dapat membengkakkan biaya pemeliharaan (*O&M*) dan penggantian komponen secara eksponensial di masa depan (Chisale *et al*., 2023; Riayatsyah *et al*., 2022). Perbandingan dampak laju inflasi terhadap kinerja keuangan sistem ini diringkas dalam Gambar 2.14 sebelumnya yang mengilustrasikan kenaikan tajam biaya penggantian dan O&M saat inflasi melonjak.

2.2.3.3 Penurunan Biaya Teknologi (Technology Learning Effects)

Peluang investasi pada *Microgrid* hibrida semakin menarik seiring dengan tren penurunan biaya teknologi energi terbarukan secara global. Biaya pemasangan panel surya, misalnya, telah mengalami penurunan kumulatif sebesar 82% sejak tahun 2010 (Khan *et al*., 2025). Fenomena yang disebut sebagai efek pembelajaran teknologi (*technology learning rates*) juga sangat menonjol pada baterai Litium-ion, yang mencatat penurunan harga hingga 88% dalam satu dekade terakhir (Jahed *et al*., 2024). Penurunan CAPEX teknologi ini memungkinkan sistem untuk mengintegrasikan kapasitas penyimpanan energi yang lebih besar tanpa menaikkan LCOE secara drastis, yang pada akhirnya meningkatkan keandalan sistem (Hartmann *et al*., 2021; Sakthivelnathan *et al*., 2024). Variasi indikator ekonomi akibat kemajuan teknologi ini dirangkum dalam Gambar 2.21 yang merinci bagaimana efisiensi biaya (NPC dan LCOE) meningkat seiring dengan kemajuan teknologi PV, WT, dan BESS.



Gambar 2. 21 Variasi indikator dalam konfigurasi sistem yang optimal berdasarkan tingkat pembelajaran teknis untuk berbagai komponen (Miao *et al.* 2023)

2.2.3.4 Mitigasi Risiko melalui Peramalan dan Optimasi

Untuk memitigasi risiko ekonomi tersebut, investasi pada metode peramalan (*forecasting*) beban dan ketersediaan sumber daya terbarukan yang kuat menjadi sangat penting (Hosseina *et al*., 2025). Akurasi prediksi yang tinggi memungkinkan operator *Microgrid* melakukan langkah pencegahan, seperti pengisian baterai lebih awal atau penyesuaian strategi manajemen beban (*demand response*), sehingga ketergantungan pada sumber daya diesel yang mahal dan volatil dapat diminimalisir (Amer *et al*., 2024; Hosseina *et al*., 2025).

2.2.4 Perbandingan Keekonomian Diesel vs. Hybrid Renewable

Perbandingan antara sistem pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) murni dengan sistem energi terbarukan hibrida (*Hybrid Renewable Energy System* atau HRES) menunjukkan pergeseran paradigma dalam efisiensi biaya jangka panjang. Meskipun generator diesel sering dipilih karena biaya investasi awal (CAPEX) yang relatif rendah, beban operasional (OPEX) yang didominasi oleh konsumsi bahan bakar dan pemeliharaan rutin membuat total biaya siklus hidupnya menjadi tidak kompetitif dibandingkan solusi hibrida (Omar *et al*., 2024; Odetoye *et al*., 2023).

2.2.4.1 Analisis Biaya Siklus Hidup (NPC dan LCOE)

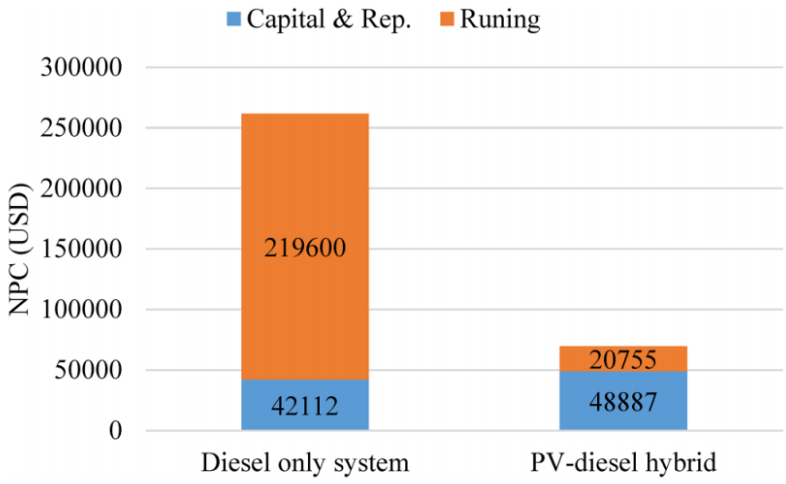
Studi komparatif secara konsisten menunjukkan bahwa sistem hibrida mampu mereduksi *Net Present Cost* (NPC) dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) secara signifikan. Sebagai ilustrasi, penelitian di komunitas rural Nigeria melaporkan bahwa sistem hibrida (PV-CSP-Hydro) memiliki NPC sebesar $55,7 juta, jauh lebih rendah dibandingkan sistem berbasis diesel murni yang mencapai $408 juta untuk periode proyek 25 tahun (Odetoye *et al*., 2023). Dari sisi unit energi, LCOE sistem hibrida tercatat sebesar $0,26/kWh, sementara sistem diesel melonjak hingga $1,01/kWh akibat akumulasi inflasi dan biaya logistik bahan bakar (Odetoye *et al*., 2023; Abirami *et al*., 2025). Perbandingan

data ekonomi ini dapat dirangkum dalam Gambar 2.22 yang menyajikan persentase reduksi NPC dan COE hingga lebih dari 60% pada sistem hibrida.

Parameter	Proposed hybrid system	Generator only system	Reduction (%)
NPC	$6191	$19 038	67.5
COE	$0.125/kWh	$0.386/kWh	67.6
CO_2 emission	575 kg/year	3232 kg/year	82.2

Gambar 2. 22 Sistem hanya genset vs sistem yang diusulkan (Ishraque *et al.* 2021)

Dapat dilihat juga pada Gambar 2.23 bahwa terlihat perbedaan mencolok antara komponen biaya *running* (operasional) pada kedua sistem.

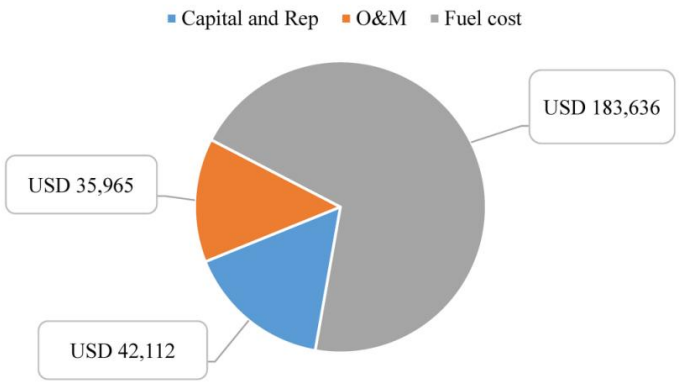


Gambar 2. 23 NPC untuk sistem hanya-diesel dan sistem hibrida (Omar *et al.* 2024)

2.2.4.2 Faktor Inefisiensi Operasional Diesel

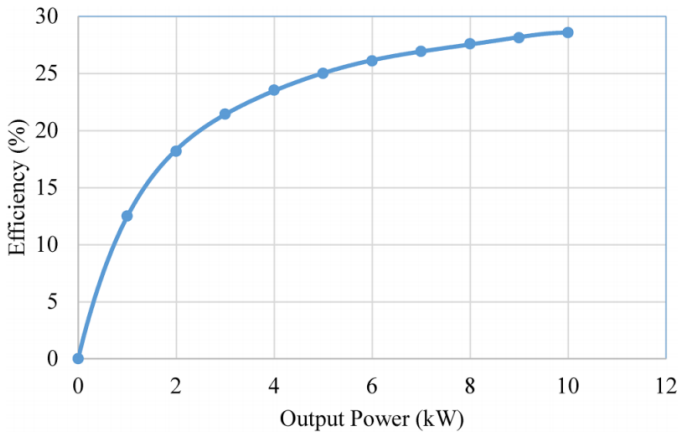
Salah satu penyebab tingginya biaya pada PLTD murni adalah pengoperasian generator pada faktor beban yang rendah (*low load factor*). Generator diesel yang beroperasi di bawah 40% dari kapasitas ratingnya akan mengalami peningkatan konsumsi

bahan bakar spesifik dan emisi yang drastis (Simatupang *et al*., 2021; Omar *et al*., 2024). Dalam sistem hibrida, generator diesel hanya berfungsi sebagai cadangan yang beroperasi pada titik efisiensi maksimum untuk mengisi baterai (*cycle charging*), sehingga biaya produksi listrik per kWh dapat ditekan (Prawitasari *et al*., 2024; Omar *et al*., 2024). Perbandingan struktur biaya diesel murni di mana komponen bahan bakar mendominasi sekitar 70% dari total NPC dapat dilihat pada Gambar 2.24 yang menunjukkan dominasi *fuel cost* terhadap total pengeluaran sistem.



Gambar 2. 24 Rincian NPC untuk sistem hanya-diesel (Omar *et al*. 2024)

Dapat dilihat juga pada Gambar 2.25 untuk menjelaskan kaitan antara *output power* dengan efisiensi operasional.



Gambar 2. 25 Kurva efisiensi generator diesel (Omar *et al*. 2024)

2.2.4.3 Tren Penurunan LCOE Terbarukan Global

Kecenderungan LCOE saat ini terus menurun seiring dengan kemajuan teknologi dan efek pembelajaran pasar (*technology learning rates*). Biaya instalasi solar PV global telah turun drastis sebesar 82% sejak tahun 2010 (Khan *et al*., 2025). Hal ini membuat sistem hibrida tidak hanya unggul secara lingkungan tetapi juga menjadi pilihan paling ekonomis bagi wilayah kepulauan terpencil yang sebelumnya sangat bergantung pada subsidi BBM (Mas'ud *et al*., 2021; Jahed *et al*., 2024). Tabel perbandingan LCOE di berbagai negara memperkuat bukti bahwa sistem hibrida kini mampu mencapai nilai di bawah $0,10/kWh pada kondisi optimal dapat dilihat pada Gambar 2.26 yang merangkum hasil studi LCOE hibrida dari berbagai literatur internasional (2012–2024).

System Components	System	LCOE (USD/kWh)	Country	Year	References
PV/WT/DG/BES	SA	0.281	Ghana	2012	[83]
PV/BM	GC	0.143	India	2014	[84]
PV/WT/FC/BES	SA	0.54	Iran	2016	[85]
PV/FC/BES	GC	0.091	Malaysia	2016	[86]
PV/WT/BES	SA	0.079–0.235	Kenya, S. Africa	2016	[87]
PV/WT/FC/HT/BES	SA/GC	0.058	Egypt	2016	[88]
PV/WT/BG/DG/NG/BES	SA	0.306	Norway	2016	[89]
PV/DG/Hydro/BG	SA	0.133	Ethiopia	2017	[90]
PV/WT/BES	GC	0.0851	Australia	2017	[91]
PV/WT/BM	GC	0.05744	Pakistan	2018	[19]
PV/DG/BES	SA	0.156–0.172	Nigeria	2018	[92]
PV/WT/BG/PHS	SA	0.256	Cameroon	2018	[93]
PV/DG/Hydro/BES	SA	0.054	Iraq	2019	[94]
PV/DG/BES	SA	0.5158	Cahada	2019	[95]
PV/BES	GC	0.1369	India	2019	[96]
PV/DG/BES	SA	0.25	Sharjah	2019	[97]
PV/WT/DG/NG	SA	0.0761	Oman	2020	[98]
PV/WT/DG/BES	SA	0.6213	India	2020	[73]
PV/WT/BG/BES	SA/GC	0.201	China	2020	[99]
PV/DG/Hydro/BES	SA	0.588	UK	2020	[100]
PV/WT/DG/Hydro/BES	GC	0.207	Benin	2020	[45]
PV/WT/BES	SA	0.5118	Canada	2020	[101]
PV/FC/HT/BES	SA	0.117	KSA	2020	[102]
PV/DG/BES	SA/GC	0.145/0.072	Pakistan	2021	[103]
PV/DG	GC	0.073	Bangladesh	2022	[104]
FPV/WT/VRF-BESS	GC	0.0520	S. Africa	2023	[70]
PV/BM	GC	0.0347	Bangladesh	2024	[105]
PV/WT/BESS	SA	0.0688	Bangladesh	2024	[106]
PV/WT/BESS	GC	0.0363	Bangladesh	2024	[107]
PV/BM/WT	GC	0.0232	Bangladesh	2024	[108]
PV/BM	GC	0.0306	Bangladesh	2024	[109]
PV	GC	0.0404	Lucknow (India)	2024	Present Study

Gambar 2. 26 Ringkasan seluruh nilai LCOE yang dilaporkan dengan sistem yang diusulkan (Khan *et al*. 2025)

Pada Gambar 2.27 dapat kita lihat untuk pembanding biaya energi di wilayah berkembang dengan karakteristik beban serupa

Location	Configuration	LCOE ($/kWh)	Study
Lade-II, Nigeria	PV/Diesel/BESS	0.396	[12]
Itapaji, Nigeria	PV/Diesel/Hydro/BESS	0.267	[42]
Muyuka, Cameroon	PV/Hydro/BESS	0.628	[56]
Djado, Niger	PV/BESS	0.115	[74]
Pategi, Nigeria	PV/Diesel/BESS	0.403	[75]
Elokato, Cote d'Ivoire	PV/Diesel/Hydro/BESS	0.203	[76]
Ajasse-Ipo, Nigeria	PV/Diesel/BESS	0.667	[77]
Kaduna, Nigeria	PV/Diesel/BESS	0.487	[78]
Fouay, Benin	PV/Diesel/BESS	0.207	[79]
Kudu, Nigeria	PV/Diesel/BESS	0.259	[80]
Djoundé, Cameroon	PV/Biogas/PHS	0.274	[73]
Arandun, Nigeria	PV/Hydro/CSP/BESS	0.261	*This study*
	Diesel	1.01	

Gambar 2. 27 Perbandingan dengan Penelitian-Penelitian Lain di Afrika Barat (Odetoye *et al.* 2023)

2.2.4.4 Keunggulan Lingkungan dan Kredit Karbon

Selain keuntungan finansial langsung, sistem hibrida memberikan peluang pendapatan tambahan melalui mekanisme ekonomi hijau, seperti penjualan kredit karbon. Penggantian diesel dengan sistem PV-Baterai diprediksi dapat menghemat emisi CO2 hingga puluhan ton per tahun, yang jika dikonversi secara ekonomi, akan semakin mempercepat periode pengembalian modal (*payback period*) proyek (Omar *et al*., 2024; Odetoye *et al*., 2023).

2.3 Optimalisasi Sistem Energi Terbarukan

Optimalisasi teknis sistem energi terbarukan hibrida (*Hybrid Renewable Energy Systems* - HRES) sangat bergantung pada penilaian akurat terhadap potensi sumber daya lokal yang tersedia di lokasi studi (Khan *et al*., 2025; Miao *et al*., 2023). Di wilayah tropis dan kepulauan, karakteristik iklim yang spesifik seperti iradiasi matahari yang tinggi namun fluktuatif, serta pola angin yang dipengaruhi oleh sirkulasi laut menentukan profil produksi energi dan kelayakan implementasi setiap teknologi (Sulaeman *et al*., 2021; Costa & Villalva, 2020).

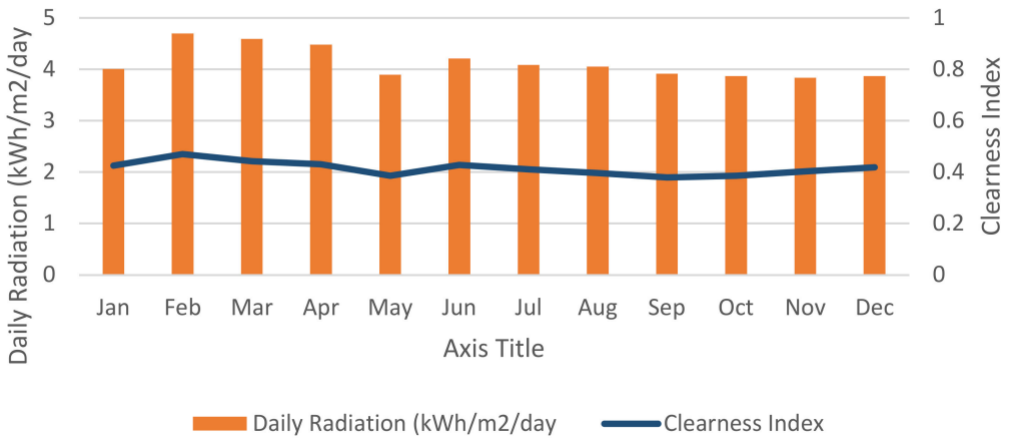
2.3.1 Potensi Teknis Solar PV, Angin, dan Biomassa

Optimalisasi teknis sistem energi terbarukan hibrida (*Hybrid Renewable Energy Systems* - HRES) di wilayah kepulauan sangat bergantung pada pemodelan akurat terhadap potensi sumber daya lokal yang tersedia di lokasi studi (Miao *et al*., 2023; Khan *et al*., 2025). Di wilayah tropis seperti Indonesia, karakteristik iklim yang spesifik menentukan profil produksi energi dan kelayakan implementasi setiap teknologi pembangkitan (Sulaeman *et al*., 2021; Simatupang *et al*., 2021).

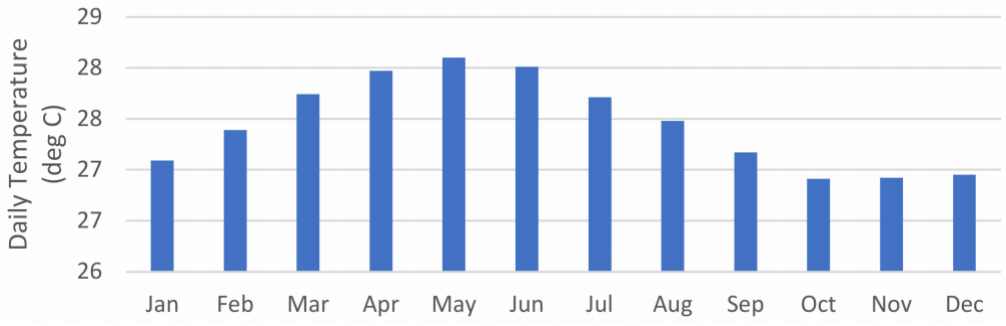
2.3.1.1 Karakteristik dan Potensi Fotovoltaik (Solar PV)

Wilayah tropis memiliki keunggulan geografis berupa potensi radiasi matahari yang melimpah sepanjang tahun karena lokasinya yang berada di sekitar garis khatulistiwa (Mas'ud *et al*., 2021; Riayatsyah *et al*., 2022). Studi empiris mencatat rata-rata *daily insolation* di wilayah kepulauan Indonesia berkisar antara 4,8 hingga 5,27 kWh/m²/hari (Prawitasari *et al*., 2024; Riayatsyah *et al*., 2022). Namun, potensi teoretis ini menghadapi tantangan teknis berupa suhu lingkungan yang tinggi; peningkatan suhu sel surya di atas kondisi standar (*Standard Test Conditions* - STC 25°C) akan mereduksi efisiensi panel secara linear berdasarkan koefisien suhu, yang umumnya berkisar pada -0,4% hingga -0,5% per °C (Mas'ud *et al*., 2021; Omar *et al*., 2024).

Selain faktor suhu, tutupan awan (*cloud cover*) dan presipitasi tinggi di daerah tropis menyebabkan profil produksi harian bersifat intermiten dan fluktuatif (Sulaeman *et al*., 2021; Abirami *et al*., 2025). Hal ini menuntut perancangan sistem penyimpanan energi yang memadai untuk menjaga kontinuitas pasokan saat radiasi rendah (Simatupang *et al*., 2021; Omar *et al*., 2024). Karakteristik radiasi harian dan korelasi suhu ini dapat divisualisasikan melalui Gambar 2.28 dan Gambar 2.29 untuk menunjukkan variabilitas musiman radiasi dan profil temperatur harian yang mempengaruhi efisiensi PV.



Gambar 2. 28 Radiasi harian surya dan indeks kecerahan di lokasi penelitian (Riayatsyah *et al.* (2022)

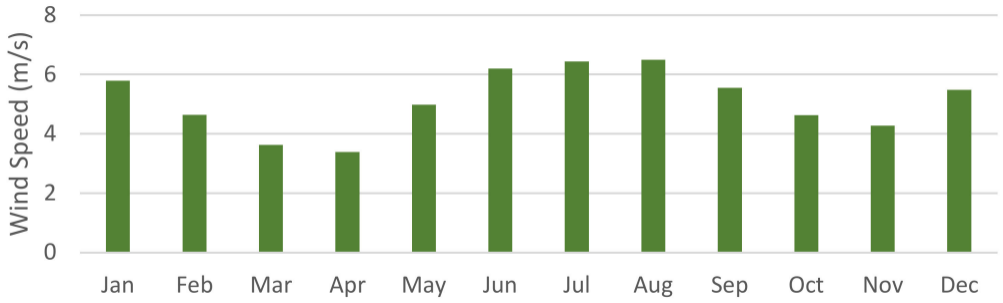


Gambar 2. 29 Suhu harian di lokasi penelitian (Riayatsyah *et al.* (2022)

2.3.1.2 Karakteristik dan Potensi Energi Angin

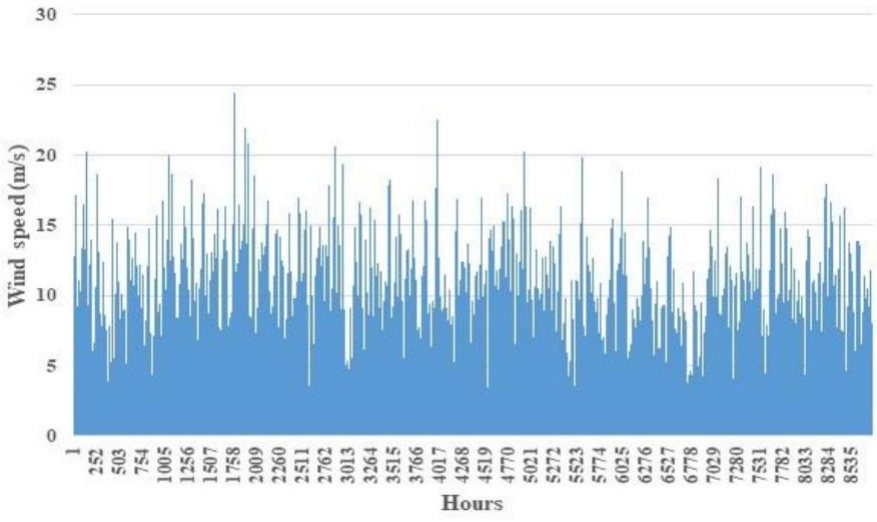
Potensi energi angin di wilayah kepulauan sangat dipengaruhi oleh topografi pesisir dan fenomena sirkulasi laut (Miao *et al*., 2023; Gomes *et al*., 2021). Kecepatan angin di area pesisir cenderung lebih tinggi dibandingkan daratan utama, namun distribusinya bersifat stokastik atau acak (Hossain *et al*., 2025; Weng *et al*., 2022). Secara teknis, daya keluaran turbin angin memiliki hubungan kubik terhadap kecepatan angin, di mana sistem memerlukan kecepatan minimal (*cut-in speed*) sekitar 3-5 m/s untuk mulai membangkitkan daya (Abirami *et al*., 2025; Weng *et al*., 2022).

Di beberapa lokasi pesisir Indonesia, seperti Baron Technopark Yogyakarta, kecepatan angin rata-rata tercatat sebesar 3 hingga 4 m/s, sementara di wilayah Aceh mencapai potensi yang lebih tinggi, memungkinkan kontribusi angin hingga 20% dalam bauran energi mikrogrid (Prawitasari *et al*., 2024; Riayatsyah *et al*., 2022). Integrasi energi angin sangat krusial untuk meningkatkan reliabilitas sistem saat malam hari ketika panel surya tidak beroperasi (Hossain *et al*., 2025; Miao *et al*., 2023). Profil ketersediaan angin tersedia pada Gambar 2.30.



Gambar 2. 30 Kecepatan angin rata-rata bulanan di lokasi penelitian (Riayatsyah *et al*. 2022)

Dapat dilihat juga pada Gambar 2.31 untuk mengilustrasikan fluktuasi kecepatan angin dalam skala waktu yang berbeda.

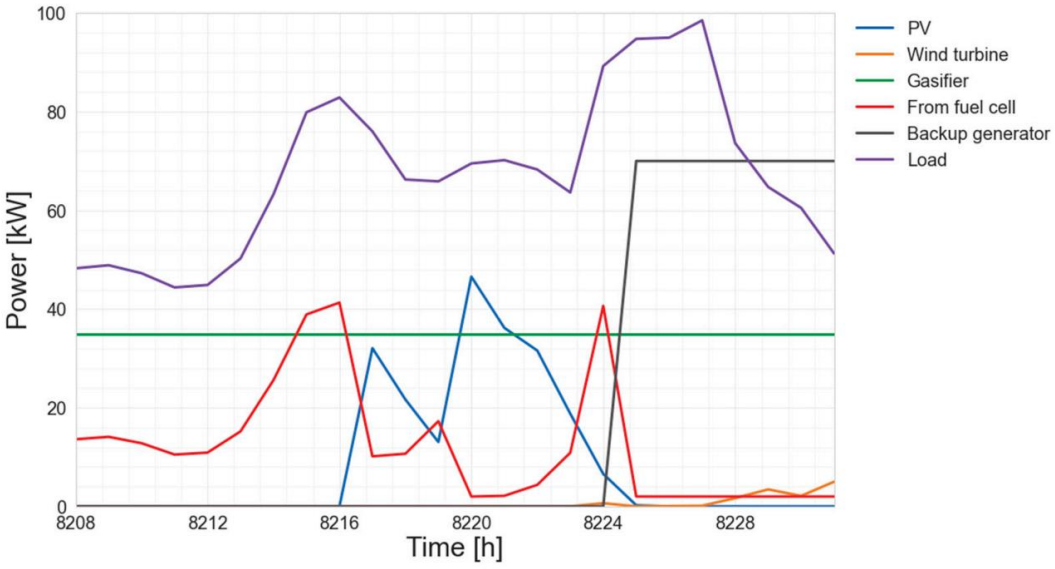


Gambar 2. 31 Kecepatan angin per jam untuk wilayah terpilih berdasarkan estimasi dari HOMER (Mas'ud *et al*. A2021)

2.3.1.3 Karakteristik dan Potensi Biomassa/Gasifier

Berbeda dengan tenaga surya dan angin, biomassa menawarkan keunggulan sebagai sumber energi beban dasar (*baseload*) yang stabil dan dapat dikontrol (*dispatchable*) (Żołądek *et al*., 2022; Ajiboye *et al*., 2023). Teknologi gasifikasi biomassa memanfaatkan limbah organik (seperti limbah kayu atau sisa pertanian) untuk menghasilkan gas sintetis yang menggerakkan generator (Żołądek *et al*., 2022; Chisale *et al*., 2023). Pemanfaatan biomassa sangat efektif untuk mereduksi kapasitas baterai yang dibutuhkan, karena unit gasifier dapat beroperasi secara kontinu tanpa tergantung pada kondisi cuaca (Żołądek *et al*., 2022; Ajiboye *et al*., 2023).

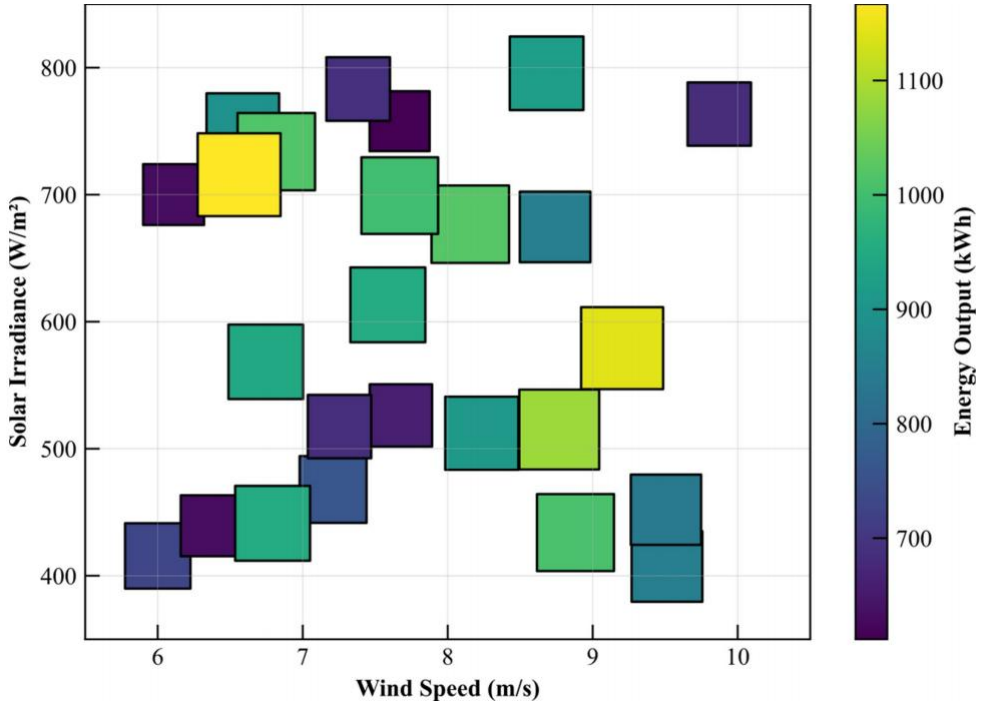
Potensi teknis biomassa ditentukan oleh nilai kalor bahan baku (*Lower Heating Value*) dan efisiensi unit gasifikasi dalam mengonversi energi termokimia menjadi listrik (Ajiboye *et al*., 2023; Żołądek *et al*., 2022). Di pulau-pulau kecil yang kaya akan hasil perkebunan, integrasi unit gasifier kayu terbukti mampu meningkatkan otonomi sistem energi mandiri (Żołądek *et al*., 2022; Miao *et al*., 2023). Peran stabilisasi biomassa ini dapat dirujuk pada Gambar 2.32 yang secara visual menunjukkan bagaimana unit gasifier menutup defisit energi saat produksi RES lainnya rendah.



Gambar 2. 32 Daya listrik sistem untuk kasus produksi rendah pada hari terpilih, 8 Desember (Żołądek *et al*. 2022)

2.3.1.4 Sinergi dan Komplementaritas Sumber Daya

Kunci utama optimalisasi di wilayah kepulauan adalah memanfaatkan sifat komplementer antar sumber daya terbarukan (Miao *et al*., 2023; Abirami *et al*., 2025). Sering kali, penurunan produksi panel surya selama musim penghujan dikompensasi oleh peningkatan kecepatan angin, atau sebaliknya (Odetoye *et al*., 2023; Hossain *et al*., 2025). Sinergi ini secara teknis mampu mereduksi *Net Present Cost* (NPC) dan meningkatkan keandalan sistem tanpa harus melakukan *oversizing* pada kapasitas baterai (Abirami *et al*., 2025; Miao *et al*., 2023). Visualisasi interaksi kompleks antara kecepatan angin, iradiasi, dan keluaran energi total dirangkum dalam Gambar 2.33 yang menyajikan korelasi dinamis antar parameter lingkungan tersebut terhadap efisiensi sistem.



Gambar 2. 33 Hubungan antara kecepatan angin, iradiasi surya, dan output energi (Abirami *et al*. 2025)

2.3.2 Teknologi Penyimpanan Energi (Baterai)

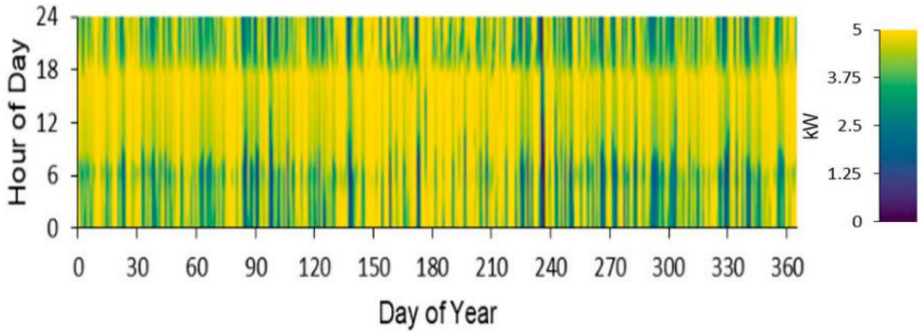
Sistem Penyimpanan Energi Baterai (*Battery Energy Storage System* atau BESS) merupakan komponen fundamental dalam *Microgrid* mandiri (*islanded*) yang berfungsi untuk memitigasi fluktuasi daya akibat sifat intermiten dari sumber energi terbarukan seperti surya dan angin (Gholami *et al*., 2023; Amer *et al*., 2024). BESS bertindak sebagai penyangga (*buffer*) yang menyimpan kelebihan energi saat produksi pembangkit melampaui permintaan, dan melepaskannya kembali saat terjadi defisit energi guna menjaga stabilitas frekuensi dan tegangan jaringan (El-Bidairi *et al*., 2020; Hossain *et al*., 2025). Pemilihan teknologi baterai yang tepat sangat krusial karena biaya investasi BESS dapat mendominasi total biaya sistem, sementara kinerjanya sangat dipengaruhi oleh strategi manajemen energi dan kondisi lingkungan operasional (Ajiboye *et al*., 2023; Jahed *et al*., 2024).

2.3.2.1 Klasifikasi dan Karakteristik Teknologi Baterai

Dalam aplikasi *Microgrid* hibrida, terdapat beberapa jenis teknologi penyimpanan elektrokimia dengan karakteristik teknis dan ekonomi yang berbeda:

1. Lithium-Ion (Li-ion)

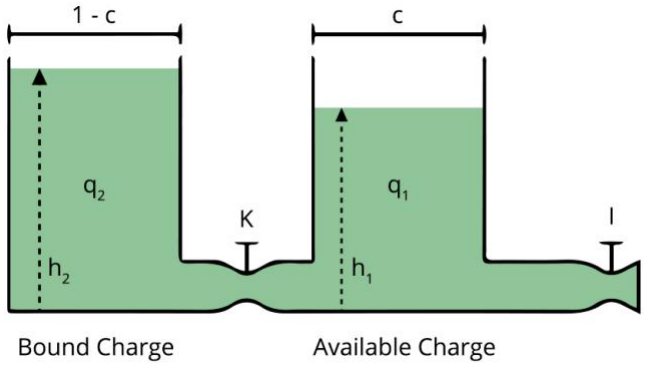
   Teknologi ini telah menjadi standar modern dalam sistem tenaga listrik karena memiliki kerapatan energi yang tinggi, respon dinamis yang sangat cepat terhadap perubahan beban, serta tingkat pelepasan daya mandiri (*self-discharge*) yang rendah (Gomes *et al*., 2021; Jahed *et al*., 2024). Baterai Li-ion menawarkan efisiensi siklus bolak-balik (*round-trip efficiency*) yang unggul, umumnya di atas 90%, dan mampu melayani siklus pengisian-pengosongan yang lebih banyak dibandingkan teknologi konvensional (Lee *et al*., 2022; Baniya *et al*., 2024). Performa teknis Li-ion secara tahunan dalam bauran energi dapat merujuk pada Gambar 2.34 yang menampilkan peta panas (*heatmap*) efisiensi operasional baterai sepanjang tahun, mencakup siklus pengisian dan pengosongan pada berbagai jam dan musim dengan skala efisiensi berkisar antara 20% hingga 100%.



Gambar 2. 34 Efisiensi Tahunan Sistem Penyimpanan Baterai (Hossain *et al*. 2025)

2. Lead-Acid (Asam-Timbal) / VRLA

Meskipun memiliki umur pakai yang relatif pendek (sekitar 5-8 tahun), teknologi *valve-regulated lead-acid* (VRLA) atau tipe *deep-cycle* seperti OPzS masih sering digunakan karena biaya investasi awal (CAPEX) yang jauh lebih rendah (Jahed *et al*., 2024; Simatupang *et al*., 2021). Pemodelan baterai jenis ini sering menggunakan pendekatan kinetik (*Kinetic Battery Model* atau KiBaM) untuk mensimulasikan distribusi muatan kimia yang tersedia. Representasi model fisis ini dapat dilihat pada Gambar 2.35 yang mengilustrasikan pendekatan kinetik (*Kinetic Battery Model*) melalui pembagian muatan kimia ke dalam dua tangki virtual, yaitu muatan yang tersedia (*available charge*) dan muatan terbatas (*bound charge*).



Gambar 2. 35 Model baterai KiBaM (Costa & Villalva 2020)

3. Flow Battery (Vanadium Redox & Zinc-Bromine): Teknologi baterai alir menawarkan keunggulan dalam kapasitas penyimpanan energi skala besar dan umur teknis yang sangat panjang (hingga 20-25 tahun) karena elektrolitnya tidak mengalami degradasi permanen seperti elektroda padat (Jahed *et al*., 2024). *Vanadium Redox* khususnya sangat efektif untuk menstabilkan keluaran daya dari ladang angin (*wind farm*) berskala besar (Jahed *et al*., 2024). Perbandingan komprehensif biaya dan spesifikasi antar teknologi ini diringkas dalam Gambar 2.36 yang menyajikan data teknis mendalam seperti tegangan nominal, kapasitas Ah, arus pengisian/pengosongan maksimum, serta parameter ekonomi seperti biaya modal (capital cost) dan biaya penggantian (replacement cost) untuk jenis baterai Lead-acid, Li-ion, Vanadium-flow, dan Zinc-flow.

Battery	Value			
Model	SIND 06 1225	Gem RESU10	Red-T 5 kW–20 kWh	ZBM2
Manufacture	Trojan	LG	Red-T	Redflow
Type	Lead-acid	Li-on	Vanadium-flow	Zinc-flow
Nominal voltage	6 V	48 V	48 V	48 V
Nominal capacity	7.61 kWh	9.71 kWh	20 kWh	10.3 kWh
Maximum capacity	1270 Ah	189 Ah	417 Ah	215 Ah
Maximum charge current	185 A	119 A	107 A	52.1 A
Maximum discharge current	300 A	119 A	107 A	104 A
Lifetime	8 years	10 years	25 years	20 years
Capital cost	$1400	$5400	$10,000	$8000
Replacement cost	$1200	$500	$10,000	$8000
O&M cost	$10	$0	$10	$10

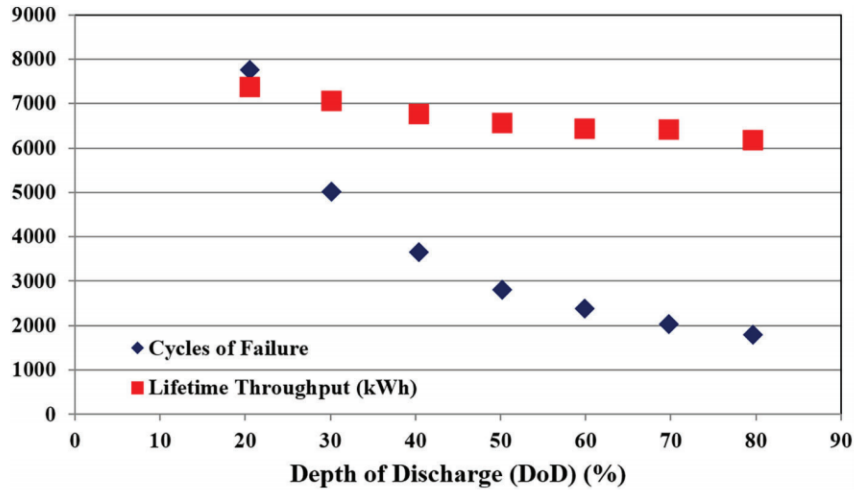
Gambar 2. 36 Model, biaya, dan detail teknis baterai (Jahed *et al*. 2024)

2.3.2.2 Parameter Kapasitas dan Batasan Operasional

Penentuan ukuran kapasitas baterai (*Bc*) harus mempertimbangkan variabel beban harian, hari otonomi (*autonomy days*), serta batasan teknis inverter (Jahed *et al*., 2024; Omar *et al*., 2024). Status energi baterai dipantau melalui *State of Charge* (SoC), yang mencerminkan persentase muatan tersisa terhadap kapasitas total (Lee *et al*., 2022; Weng *et al*., 2022). Untuk mencegah kerusakan permanen dan memperpanjang masa pakai teknis, BESS umumnya dibatasi untuk beroperasi pada rentang SoC tertentu, biasanya

antara 20% (SoC min) hingga 80-90% (SoC max) (Lee *et al*., 2022; Amer *et al*., 2024; Weng *et al*., 2022).

Efisiensi BESS juga dipengaruhi oleh tingkat pengosongan atau *Depth of Discharge* (DoD). Pengoperasian pada DoD yang sangat dalam secara konsisten akan mereduksi jumlah siklus hidup baterai secara drastis (Ishraque *et al*., 2021; Amer *et al*., 2024). Hubungan non-linear antara kedalaman pengosongan dengan keandalan sistem dapat divisualisasikan pada Gambar 2.37 yang mengilustrasikan penurunan tajam *throughput* energi seiring meningkatnya persentase DoD.



Gambar 2. 37 DoD baterai dengan masa pakai dan siklus kegagalan (Ishraque *et al*. 2021)

2.3.2.3 Mekanisme Degradasi dan Penurunan Efisiensi

Deteriorasi performa BESS digambarkan melalui dua parameter utama: *capacity fading* (penurunan kapasitas penyimpanan) dan *efficiency loss* (penurunan efisiensi pengisian-pengosongan) (Nallainathan *et al*., 2025). Degradasi ini terjadi melalui dua mekanisme utama:

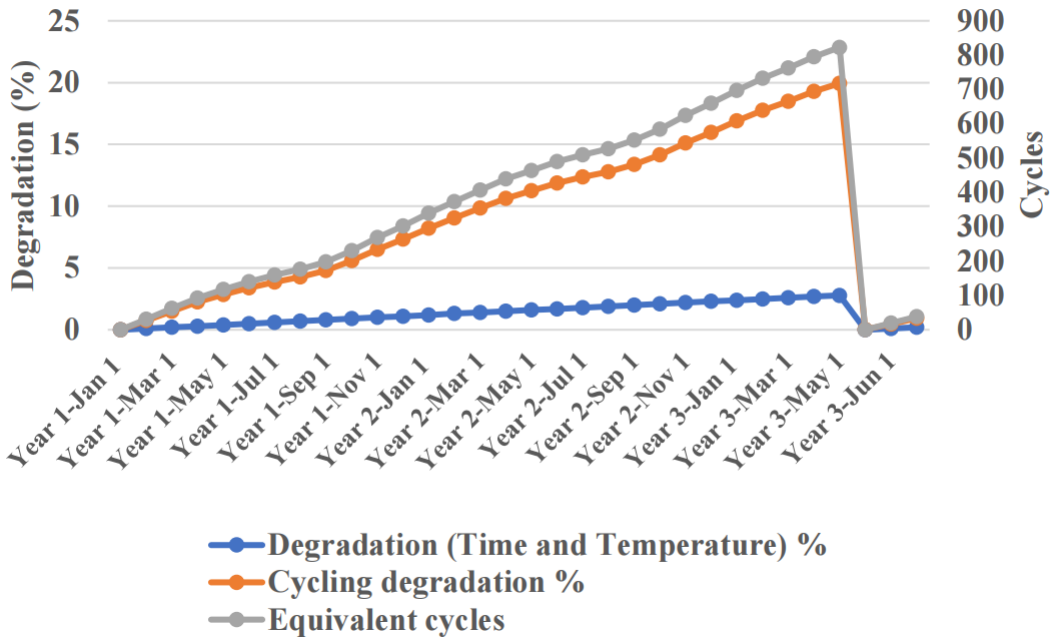
1. *Cycle Degradation*

Terjadi akibat kelelahan material selama proses pengisian dan pengosongan berulang yang dipengaruhi oleh nilai DoD dan laju arus (Mas'ud *et al*., 2021; Amer *et al*., 2024).

2. *Calendar Degradation*

   Terjadi secara alami seiring waktu, di mana faktor suhu lingkungan menjadi pemicu utama kerusakan kimiawi di dalam sel (Mas'ud *et al*., 2021; Simatupang *et al*., 2021).

Di wilayah kepulauan tropis, suhu ruangan yang tinggi tanpa kontrol termal yang memadai menjadi penyebab utama kegagalan dini BESS. Sebagai contoh, umur teknis baterai VRLA dilaporkan berkurang sebesar 50% untuk setiap kenaikan suhu operasional 8,3°C hingga 10°C di atas standar 25°C (Simatupang *et al*., 2021). Analisis mengenai proporsi kontribusi masing-masing degradasi ini selama umur proyek tersedia pada Gambar 2.38 yang membandingkan dampak *cycling degradation* terhadap *calendar degradation* secara visual.



Gambar 2. 38 Degradasi dan siklus ekuivalen baterai (Mas'ud *et al*. 2021)

2.3.2.4 Dampak Kegagalan BESS pada Keandalan Sistem

Kegagalan fungsi baterai, baik karena kesalahan desain maupun kurangnya pemeliharaan, secara langsung menurunkan indikator keandalan sistem seperti *Expected Energy Not Served* (EENS) dan *Loss of Load Expectation* (LOLE) (Gholami *et al*., 2023; Nallainathan *et al*., 2025). Bukti empiris di beberapa lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa estimasi beban yang tidak akurat menyebabkan baterai bekerja melebihi batas desainnya, yang berujung pada kerusakan sel dan pengabaian situs pembangkit (Simatupang *et al*., 2021; Sulaeman *et al*., 2021). Fenomena kerusakan fisik baterai akibat beban berlebih ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.5 sebelumnya yang memberikan bukti visual degradasi baterai di lapangan akibat peramalan beban yang buruk.

2.3.3 Strategi Operasi dan Dispatch Pembangkit

Strategi pengiriman (*dispatch strategy*) didefinisikan sebagai seperangkat instruksi atau algoritma kontrol yang mengatur aliran energi antar komponen dalam *Microgrid*, terutama ketika sumber energi terbarukan tidak mencukupi untuk memenuhi permintaan beban (Ishraque *et al*., 2021; Amer *et al*., 2024). Pemilihan strategi *dispatch* yang tepat sangat krusial karena berdampak langsung pada biaya operasional total, emisi gas rumah kaca, keandalan sistem, serta usia pakai komponen seperti baterai dan generator diesel (Ishraque *et al*., 2021; Prawitasari *et al*., 2024). Secara umum, strategi ini bertujuan untuk menyeimbangkan ketersediaan daya secara *real-time* sambil meminimalkan penggunaan bahan bakar fosil (Lee *et al*., 2022; Omar *et al*., 2024).

2.3.3.1 Strategi Load Following (LF)

Dalam strategi *Load Following*, generator cadangan (diesel) hanya akan beroperasi untuk menghasilkan daya yang cukup guna memenuhi beban primer tanpa menyuplai energi untuk pengisian baterai (Ishraque *et al*., 2021; Omar *et al*., 2024). Prioritas utama diberikan kepada sumber energi terbarukan (RES) untuk melayani beban, dan baterai hanya diizinkan untuk mengisi daya jika terdapat kelebihan produksi dari RES

(Prawitasari *et al*., 2024; Ishraque *et al*., 2021). Strategi ini sangat efektif dalam memaksimalkan penetrasi energi terbarukan dan mengurangi kelebihan energi (*excess energy*), namun sering kali memaksa generator diesel bekerja pada faktor beban yang rendah (*low load factor*), yang dapat menurunkan efisiensi bahan bakar (Simatupang *et al*., 2021; Omar *et al*., 2024). Karakteristik operasional LF dibandingkan dengan strategi lainnya diringkas dalam Gambar 2.39 yang merinci kriteria aktivasi, kondisi operasi, konsumsi bahan bakar, dan frekuensi *startup* untuk strategi LF dan CC.

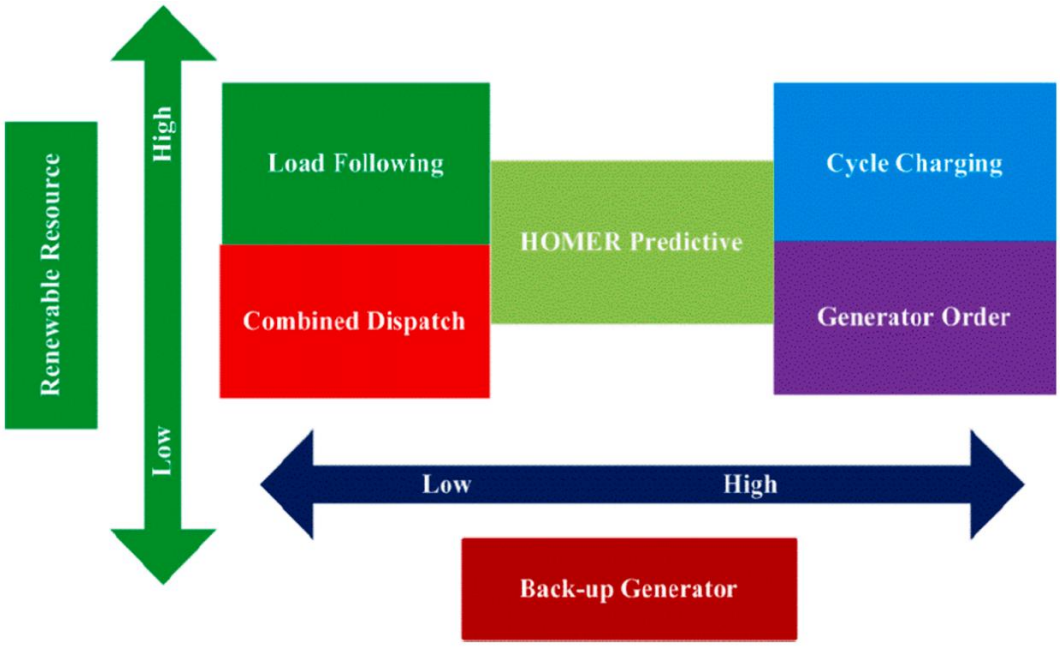
	Cycle charging	Load following
Activation criteria	Starts on at min SOC, supply load and charging battery, turn off at SOC set point	Starts on at min SOC, supply load only avoid charging the battery, turn off at SOC set point
Operating conditions	High load factor, high efficiency	Low load factor, low efficiency
Fuel consumption	Lower fuel consumption	Higher fuel consumption
Startup frequency	Reduced	More frequent
Emissions	Reduced	Increased

Gambar 2. 39 Perbandingan antara strategi kontrol (*dispatch strategies*) (Omar *et al*. 2024)

2.3.3.2 Strategi Cycle Charging (CC)

Berbeda dengan LF, strategi *Cycle Charging* menginstruksikan generator diesel untuk beroperasi pada kapasitas penuh atau pada titik efisiensi maksimumnya segera setelah diaktifkan (Ishraque *et al*., 2021; Omar *et al*., 2024). Kelebihan daya yang dihasilkan oleh generator, selain untuk memenuhi beban, digunakan secara simultan untuk mengisi baterai hingga mencapai batas muatan (*SOC set point*) tertentu (Omar *et al*., 2024; Prawitasari *et al*., 2024). Strategi ini sangat ideal untuk sistem dengan penetrasi energi terbarukan yang rendah karena mampu mengurangi frekuensi siklus *start-stop* generator, sehingga memperpanjang umur mekanis mesin dan menjaga konsumsi bahan bakar tetap efisien (Ishraque *et al*., 2021; Omar *et al*., 2024). Visualisasi prioritas

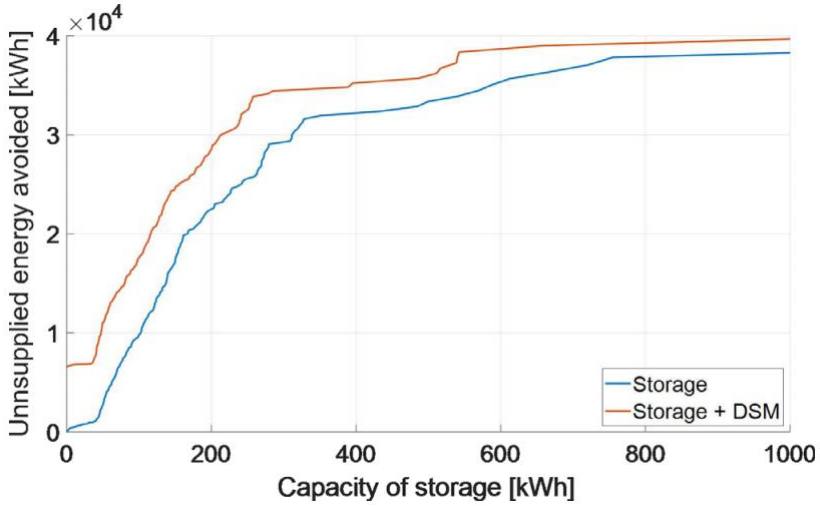
operasional ini dapat dirujuk pada Gambar 2.40 yang mengilustrasikan hierarki penggunaan RES dan generator cadangan.



Gambar 2. 40 Dampak sumber energi terbarukan dan mesin diesel berdasarkan berbagai strategi kontrol (*dispatch*) untuk IHMS (Ishraque *et al*. 2021)

2.3.3.3 Strategi Peak Shaving dan Demand Side Management (DSM)

Peak shaving adalah strategi untuk mengurangi beban puncak yang harus ditanggung oleh generator melalui pelepasan energi dari baterai atau pengurangan beban secara terkendali (Hosseina *et al*., 2025; Gholami *et al*., 2023). Integrasi *Demand Side Management* (DSM) memungkinkan pergeseran beban (*load shifting*) dari jam sibuk ke jam dengan produksi energi terbarukan tinggi, yang secara teknis meningkatkan otonomi sistem (Hartmann *et al*., 2021; Baniya *et al*., 2024). Selain baterai stasioner, teknologi *Vehicle-to-Grid* (V2G) dari kendaraan listrik juga dapat berkontribusi pada *peak shaving* dengan menyalurkan energi kembali ke jaringan saat harga listrik tinggi atau saat terjadi defisit pembangkitan (Hosseina *et al*., 2025; Baniya *et al*., 2024). Dampak DSM terhadap pengurangan energi yang tidak terlayani (*unsupplied energy*) dapat dilihat pada Gambar 2.41 yang membandingkan performa sistem dengan dan tanpa integrasi DSM.



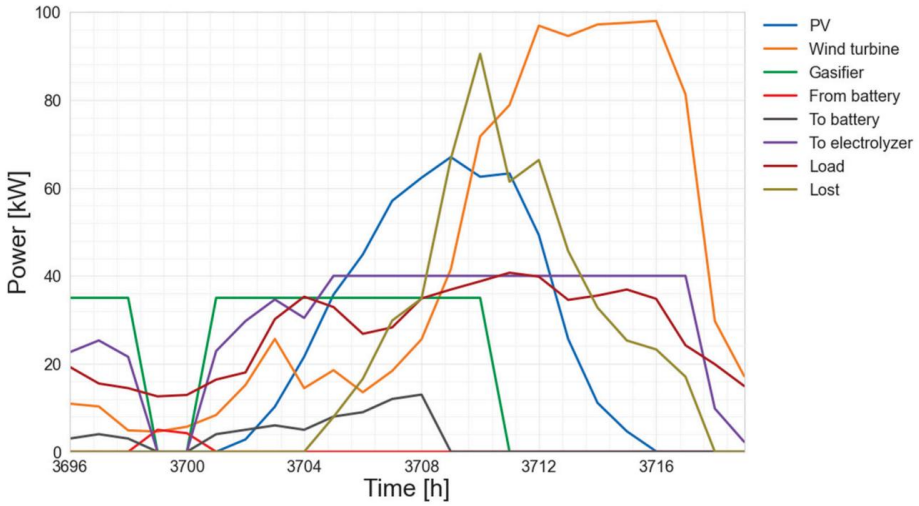
Gambar 2. 41 Energi yang tidak tersuplai pada kasus operasional penyimpanan energi (Hartmann *et al.* 2021)

2.3.3.4 Pengaturan Prioritas dan Hierarki Sumber Energi

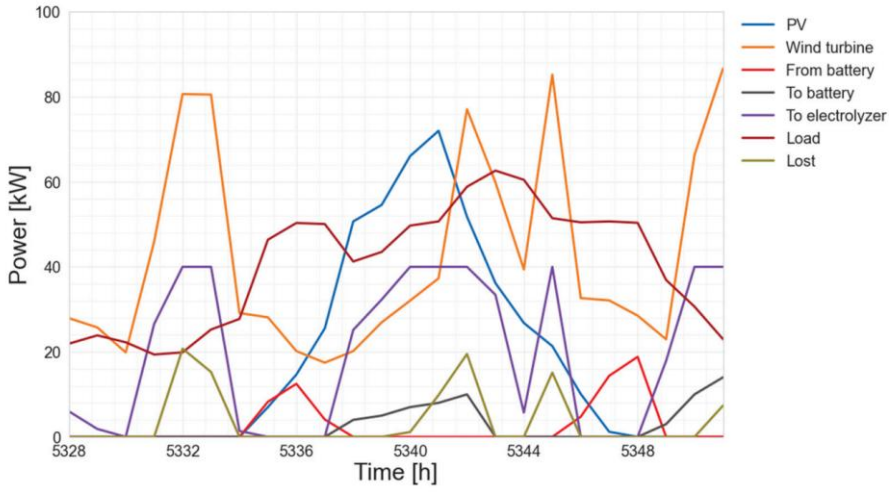
Untuk menjaga stabilitas frekuensi dan tegangan pada *Microgrid* mandiri, pengaturan prioritas sumber daya harus didefinisikan secara ketat dalam algoritma kontrol (Żołądek *et al*., 2022; El-Bidairi *et al*., 2020). Urutan prioritas yang umum diterapkan dalam *Microgrid* hibrida modern adalah sebagai berikut (Żołądek *et al*., 2022; Hossain *et al*., 2025):

1. Sumber Terbarukan (PV/Wind): Digunakan langsung untuk menyuplai beban secara maksimal.
2. Sistem Penyimpanan (BESS): Menutup selisih antara produksi RES dan beban selama kapasitas SOC masih di atas batas minimum (misalnya 15-20%).
3. Pembangkit Terkendali (Gasifier/Biomassa): Bertindak sebagai beban dasar (*baseload*) tambahan jika tersedia.
4. Generator Cadangan (Diesel/LPG): Beroperasi sebagai upaya terakhir (*last resort*) ketika baterai kosong dan produksi terbarukan tidak memadai.

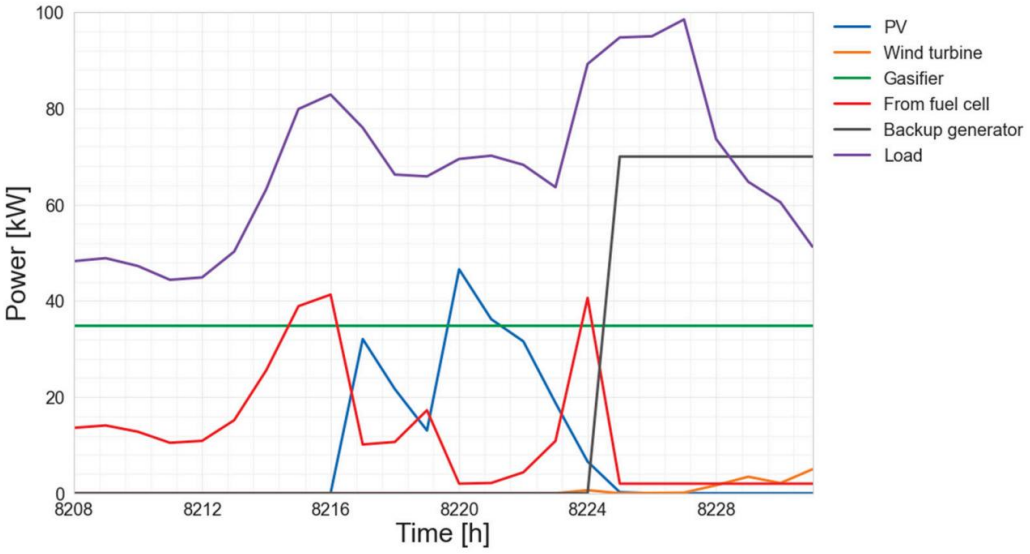
Keseimbangan daya dinamis ini secara matematis harus memenuhi persamaan daya masuk sama dengan daya keluar plus rugi-rugi jaringan (Hossain *et al*., 2025; Weng *et al*., 2022). Alur kerja sistem dalam mengelola berbagai skenario produksi (surplus, komplementer, atau defisit) divisualisasikan secara detail dalam Gambar 2.42, Gambar 2.43 Gambar 2.44 yang menunjukkan profil aliran daya sistem pada kondisi *overproduction*, produksi komplementer, dan kondisi kekurangan energi terbarukan.



Gambar 2. 42 Daya Listrik Sistem Pada Kasus Produksi Berlebih (Żołądek *et al*. 2022)



Gambar 2. 43 Daya Listrik Sistem Untuk Kasus Produksi Komplementer (Żołądek *et al*. 2022)



Gambar 2. 44 Daya listrik sistem untuk kasus produksi rendah (Żołądek *et al*. 2022)

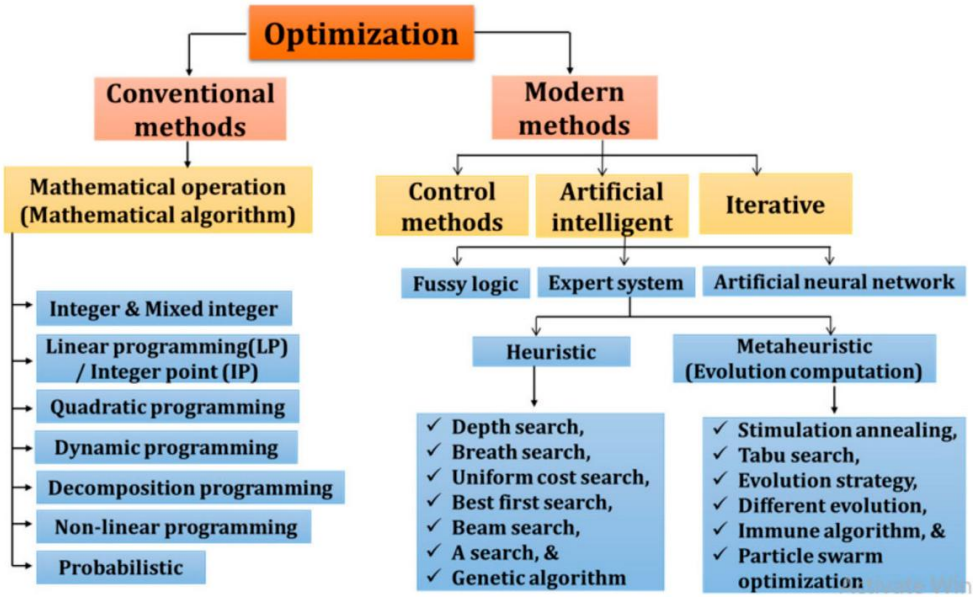
2.3.3.5 Strategi Dispatch Lanjutan (Combined dan Predictive)

Beberapa penelitian terbaru memperkenalkan strategi *Combined Dispatch* (CD) yang secara dinamis beralih antara LF dan CC berdasarkan biaya marjinal pada setiap langkah waktu (Ishraque *et al*., 2021; Prawitasari *et al*., 2024). Selain itu, *Predictive Dispatch* memanfaatkan perkiraan cuaca dan pola beban masa depan untuk mengoptimalkan jadwal pengisian baterai, sehingga dapat memitigasi risiko intermitensi sebelum terjadi gangguan pada sistem (Amer *et al*., 2024; Ishraque *et al*., 2021). Perbandingan performa NPC dan emisi dari berbagai strategi ini telah dirangkum dalam Gambar 2.22 sebelumnya yang membuktikan bahwa pemilihan strategi *dispatch* yang tepat dapat mereduksi NPC hingga lebih dari 60%.

2.3.4 Metode dan Alat Optimasi Sistem

Proses perancangan *Microgrid* hibrida melibatkan kompleksitas tinggi dalam menentukan kapasitas optimal komponen guna mencapai keseimbangan antara keandalan

teknis dan efisiensi ekonomi (Ajiboye *et al*., 2023; Baniya *et al*., 2024). Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan alat bantu berupa perangkat lunak simulasi dan algoritma optimasi yang mampu menangani variabel deterministik maupun stokastik, seperti fluktuasi cuaca dan pola beban yang dinamis (Hossain *et al*., 2025; Khan *et al*., 2025). Metode optimasi ini secara umum diklasifikasikan menjadi metode konvensional (seperti *linear programming*) dan metode modern yang berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) (Ajiboye *et al*., 2023). Klasifikasi komprehensif mengenai teknik-teknik optimasi ini dapat Anda tuangkan dalam tesis melalui Gambar 2.45 yang memberikan peta jalan visual mengenai pembagian metode konvensional dan modern.



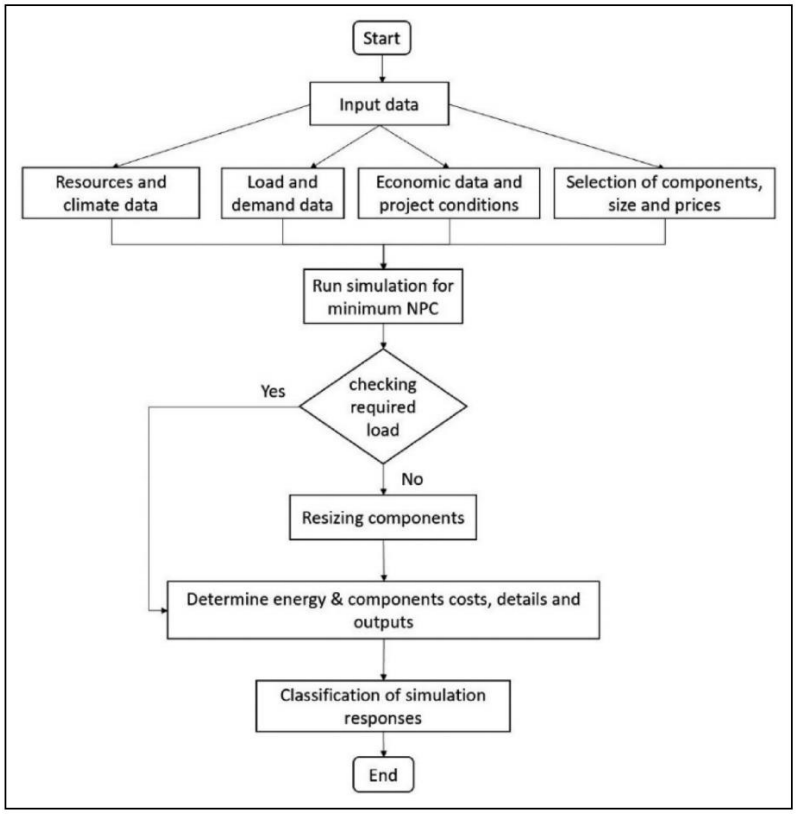
Gambar 2. 45 Klasifikasi teknik-teknik optimasi (Ajiboye *et al*. 2023)

2.3.4.1 Perangkat Lunak Optimasi Sistem Energi

Beberapa perangkat lunak telah dikembangkan untuk membantu perencanaan energi pada *Microgrid* pulau, di mana masing-masing memiliki keunggulan spesifik dalam hal akurasi, kecepatan simulasi, dan kemudahan antarmuka pengguna (Miao *et al*., 2023; Ishraque *et al*., 2021).

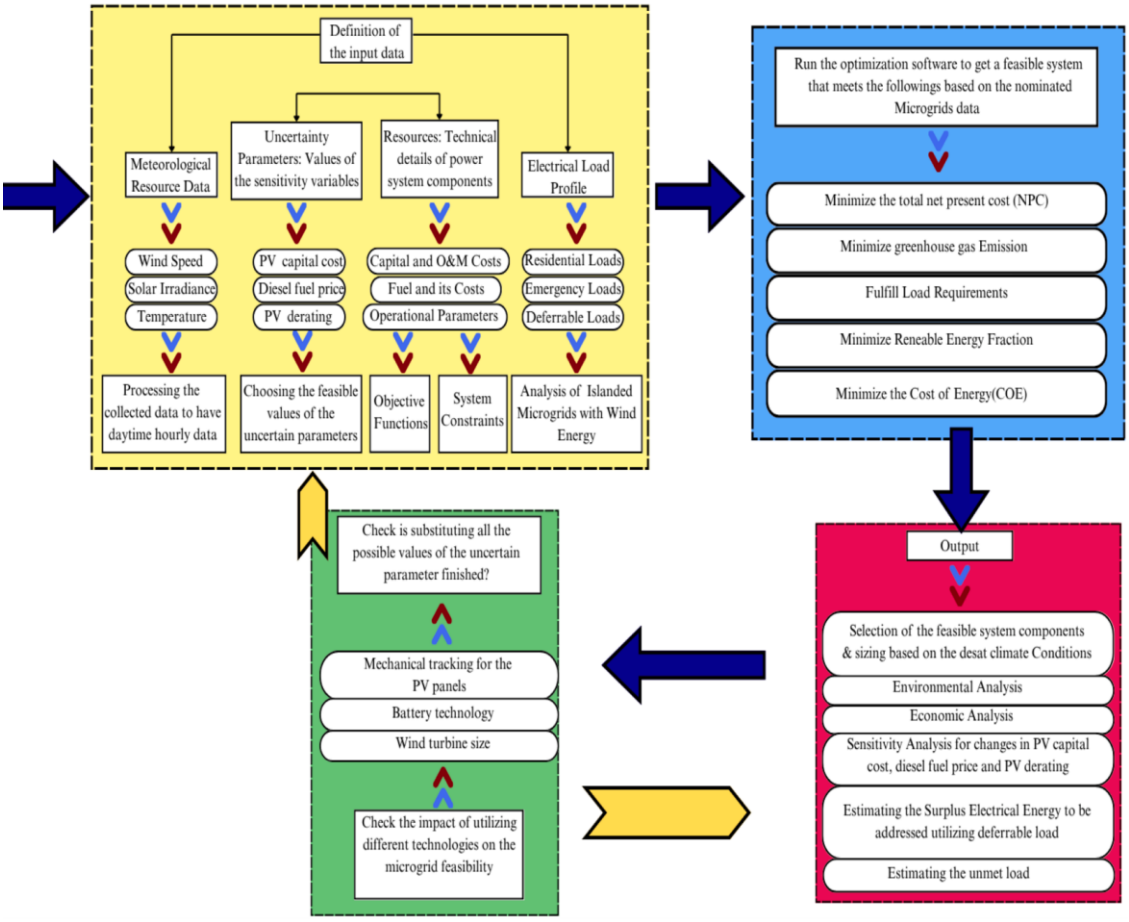
1. HOMER (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*)

HOMER Pro dan HOMER Grid merupakan perangkat lunak yang paling luas digunakan oleh para peneliti secara global karena kemampuannya dalam melakukan tiga tugas utama: simulasi, optimasi, dan analisis sensitivitas dalam satu platform (Costa & Villalva, 2020; Chisale *et al*., 2023). HOMER bekerja dengan mengevaluasi ribuan kombinasi konfigurasi sistem setiap jam selama satu tahun untuk menemukan nilai *Net Present Cost* (NPC) terendah (Mas'ud *et al*., 2021; Jahed *et al*., 2024). Keunggulan utamanya terletak pada kemudahan integrasi data meteorologi NASA serta fleksibilitas dalam memodelkan tarif listrik yang kompleks (Riayatsyah *et al*., 2022; Baniya *et al*., 2024). Alur kerja sistematis dalam pemodelan menggunakan HOMER tersedia pada Gambar 2.46 yang mengilustrasikan proses iteratif mulai dari input data sumber daya dan iklim, profil beban, hingga pencapaian konfigurasi yang memenuhi permintaan beban dengan *Net Present Cost* (NPC) terendah.



Gambar 2. 46 Flowchart for optimizing hybrid renewable systems (Jahed *et al*. 2024)

Pada Gambar 2.47 kita dapat melihat rincian langkah-langkah berurutan antara pengumpulan data dan perancangan model untuk optimasi manajemen energi pada sistem hibrida.



Gambar 2. 47 Arsitektur Sistem untuk Mengoptimalkan Desain Mikrogrid dengan Integrasi Energi Angin Menggunakan HOMER PRO (Hossain *et al*. 2025)

2. RETScreen

Perangkat lunak ini sering digunakan untuk analisis pra-kelayakan proyek energi bersih. RETScreen dinilai sangat efektif dalam mereduksi biaya identifikasi proyek di awal dibandingkan dengan HOMER Pro, namun memiliki keterbatasan karena tidak mempertimbangkan parameter teknis baterai secara mendalam

seperti *State of Charge* (SoC) dan *Depth of Discharge* (DoD) (Ishraque *et al*., 2021; Ajiboye *et al*., 2023).

3. iHOGA (*Improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms*)

   iHOGA merupakan alat optimasi yang menggunakan algoritma genetika untuk menentukan ukuran komponen sistem hibrida. Meskipun fungsinya dianggap lebih kompleks bagi pengguna pemula dibandingkan HOMER, iHOGA menawarkan kemampuan lebih eksplisit dalam menerapkan strategi kontrol kustom pada proses penentuan ukuran (*sizing*) HRES (Ishraque *et al*., 2021; Ajiboye *et al*., 2023).

Perbandingan mendalam mengenai kekuatan dan kelemahan dari masing-masing perangkat lunak ini dirangkum secara detail dalam Gambar 2.48 yang menyajikan analisis kritis terhadap HOMER, iHOGA, dan RETScreen.

Techniques/Tools	Strengths	Weakness	Ref
HOMER Pro Software	A quick way to get an objective solution from a single target objective	The initial properties of the linear equation model cannot be specified. The system is assumed to remain stationary throughout the study. It does not allow the user to naturally select the appropriate device. The effect of possible future battery charging/DOD growth is not taken into account. The solution is limited by the range of input parameters and cannot provide key value metrics if there are missed like modern optimisation algorithms. It cannot accept a control strategy like iHOGA.**It is less superior to Nature-inspired algorithms. Experienced criterion is required for the optimisation to converge to a good solution.	(Atallah et al. 2020; Chauhan and Saini 2014; Clack, Xie, and Macdonald 2015; Erdinc and Uzunoglu 2012; Kavadias and Triantafyllou 2021; Khare, Nema, and Baredar 2017; Okedu and Uhunmwangho 2014; Ramli et al. 2017; Saiprasad, Kalam, and Zayegh 2018; Zhou et al. 2010)
iHOGA	Ability to explicitly apply control strategy in HRES sizing.	Considered only single objective and Non-linear problems	(Saiprasad, Kalam, and Zayegh 2018)
Retscreen	Significantly reduces the costs associated with identifying and assessing potential energy projects compared to Homer Pro.	Compile manually in a workbook/Excel sheet	(Ramli et al. 2017)
Probabilistic	It is stochastic and can randomly determine the best solution from the available data.	It cannot adequately represent the dynamic nature of performance changes within a hybrid system. It is less efficient than the analytical method	(Chauhan and Saini 2014; Clack, Xie, and Macdonald 2015; Ganguly, Kalam, and Zayegh 2018; Kaabeche, Belhamel, and Ibtiouen 2011; Lian et al. 2019; Zhou et al. 2010)
Iterative	It is effective in obtaining minimised costs through linear variable parameters or linear programming techniques.	Considered inefficient for optimising swept area of the turbine, turbine height, the area of PV installations, and PV module angle, which have a more significant effect on cost.	(Chauhan and Saini 2014)
Analytical	It can accept long-term climatology data with short-time consumption and provides selective comparative information for decision-making for the best viable systems. The analytical method is more efficient than the Monte Carlos Method.	The model cannot estimate the position-related mathematical equation coefficient.	(Khatib, Ibrahim, and Mohamed 2016; Lian et al. 2019; Luna-Rubio et al. 2012)
Graphical	The simplest method of representing complex problems/situations involving too many mathematics equations.	It cannot accommodate more than two-dimensional problems. Due to the variable scale and difficulty in graphical interpretation, the accuracy of the solution is questionable. Difficulty in graphing non-linear, exponential, logarithmic, and trigonometric expressions. It is characterised by an unrealistic assumption that deterred its suitability except combining with other methods.	(Erdinc and Uzunoglu 2012; Rathore and Patidar 2019)
	It exhibits linearity between variables. It is characterised by good convergence and is less rigorous		(Birge and Louveaux 2011; Kavadias and Triantafyllou 2021; Khare, Nema, and Baredar 2017; Okedu and

Linear Programming (LP)		It can be stuck in local search. It loses accuracy and certainty over time. It also failed to consider evolution and changes in variables.	Uhunmwangho 2014; Ramli et al. 2017; Saiprasad, Kalam, and Zayegh 2018; Sinha and Chandel 2015)
Genetic algorithm (GA)	Ability to handle several parameters (integer, discrete, non-differential, and so on) simultaneously as multiple targets/objectives at the same time. The parallelism properties of GA allow multiple schemes to be implicitly evaluated at the same time, giving a greater chance of obtaining the optimal solution at each iteration. It can yield good results from several/ different problem formations. GA outperformed HOMER Pro software and SA in terms of cost and environmental analysis.	Consume more time with an increase in the length of chromosomes. It takes more time and less computation effort than the Analytical method. It is only meant for local searching unlike other natured-inspired algorithms with both local and global search space.	(Birge and Louveaux 2011; Craenen et al. 2000; Hobson 1978; Iweh, Clarence, and Roger 2022; Momoh, El-Hawary, and Adapa 1999; Raju 2014; Riaz et al. 2022; Saiprasad, Kalam, and Zayegh 2018; Shorman and Pitchay 2015; Sultana et al. 2016)
Tabu Search (TS)	Ability to seek efficient and cost-effective solutions. It provides better local search capabilities than GA. Better than SA to get neighbourhood solutions.	Exploration can be trapped in local search due to its fixed size and static nature.	(Couman, de Klerk, and Jansen 2014; Qu 1986; Suresh, Muralidhar, and Kiranmayi 2020; Zuhaimy 2009)
Firefly Algorithm (FA)	Ability to deal with the multimodal problem. It performs more brilliantly than PSO.	It can be stuck in local search and has a relatively long convergence time.	(Hashmi et al. 2013; Lohrer 2013; Yang and Xingshi)
Simulated Annealing (SA)	Achieving optimal results is systematic and deterministic. Easy to programme. It is robust enough to handle the non-linear problem and various constraints. Flexibility and ability to switch from local search to global search.	Low performance with relatively long computational time.	(Busetti 2003; Skoonpong and Sirisumrannukul 2008)
Gravitation Search Algorithm (GSA)	It has two variable adjustable parameter settings (speed and mass). It has less memory than other nature-inspired algorithms. The algorithm is more suitable for non-linear problems and is more efficient than HS in analysing database functions.	It is complicated (complex). Gravitation constant (G) is difficult to appropriate. Convergence time is longer and if the initial population is not created correctly, there may be a convergence problem.	(Rather 2019; Sabri 2013; Systems and Sahoo 2014; Enikeeva et al.; Narimani et al. 2014)
Grey Wolf Optimiser (GWO)	Fewer parameters like GSA above and easy to implement.	Inability to exist local search due to slow convergence speed at the later end of the iteration. It is characterised by low precision/accuracy.	(Grey and Optimization 2022; Wang et al. 2020)
Harmony Search (HS)	Fewer turn-able control parameters are needed. An initial decision variable setting is not required. Require no derivative information. Better than K-means and GS in cluster problem analysis.	Slow and premature convergence. Poor limitation and adaptability search range.	(Dubey et al. 2021; Kumar, Chhabra, and Kumar 2012; Yusup et al. 2018)
Particle Swarm Algorithm (PSO)	Require fewer turn-able control parameters. Ability to perform parallel computation with high convergence speed. Ability to find the best global solution with high efficiency. Ability to solve complex problems.	Exhibit poor local search when dealing with the high-dimensional problem. It's characterised by premature convergence.	(Systems and Sahoo 2014; Enikeeva et al.; Dubey et al. 2021; Gad 2022; Grey and Optimization 2022; Gupta and Srivastava 2020; Kumar, Chhabra, and Kumar 2012; Li, Du, and Nian 2014; Narimani et al. 2014; Search, Zhang, and Zhang 2020; Wang et al. 2020; Yusup et al. 2018)
Ant Colony Optimization (ACO)	Rapid discovery of good solutions because of positive feedback mechanisms. It exhibits parallelism. It can be easily customized and has the great advantage of being combined with another algorithm to get a powerful and highly reliable algorithm. It returns the global minimum with fewer iterations compared to PSO.	Improper selection of initial parameter values might lead to local search stagnation immature convergence and inability to reach an optimum solution. It can only handle discrete problems while continuous problems might pose a problem	(Abreu et al. 2011; Gupta and Srivastava 2020; Selvi and Tamilnadu 2010; Shehab, Khader, and Al-Betar 2017)
Cuckoo Search	Fewer turn-able control parameters are needed. It enhances by Levi's flight trait/character, which helps to converge at global optima solution. Strong random searching path and optimisation capacities. Strong affinity to form a hybridising with other algorithms.	It can be stuck in local search if initial parameters are not properly set. Slow convergence time	(Babukartik 2012; Liu et al. 2018; Shehab, Khader, and Al-Betar 2017; Shen et al. 2021)

Gambar 2. 48 Perbandingan alat/teknik optimasi HRES (Ajiboye *et al*. 2023)

2.3.4.2 Pendekatan Metaheuristik dalam Optimasi

Pendekatan metaheuristik menjadi solusi unggul untuk masalah optimasi *Microgrid* yang bersifat non-linear, berdimensi tinggi, dan memiliki banyak batasan (*constraints*) (El-Bidairi *et al*., 2020; Hosseina *et al*., 2025). Berbeda dengan metode deterministik, algoritma ini memanfaatkan pencarian stokastik yang terinspirasi dari fenomena alam untuk menemukan solusi optimal global tanpa terjebak pada solusi optimal lokal (Ajiboye *et al*., 2023; Hosseina *et al*., 2025).

1. Algoritma Genetika (Genetic Algorithm - GA)

GA merupakan algoritma pencarian berbasis populasi yang meniru proses seleksi alam, termasuk mekanisme *crossover* dan mutasi (Ajiboye *et al*., 2023; Hosseina *et al*., 2025). GA sangat efektif dalam menangani berbagai parameter sekaligus (integer maupun diskrit) untuk mencapai target multi-objektif (Ajiboye *et al*., 2023). Beberapa studi menunjukkan bahwa GA mampu memberikan solusi yang lebih optimal dibandingkan HOMER untuk skenario rural yang sangat spesifik (Odetoye *et al*., 2023). Pengaturan parameter standar GA diringkas dalam Gambar 2.49 yang merinci parameter operasional esensial seperti ukuran populasi (100), jumlah iterasi (500), penggunaan *Tournament Selection*, serta penetapan tingkat *Crossover* sebesar 0,8 dan tingkat mutasi sebesar 0,1 untuk mencapai konvergensi optimal dalam masalah manajemen energi.

Algorithm	Population Size	Iterations	Key parameters
MOMFA (Proposed)	100	500	Archive Controller, Adaptive Spiral Motion, Dynamic Flame Reduction
Genetic Algorithm (GA)	100	500	Tournament Selection, Crossover Rate: 0.8, Mutation Rate: 0.1
Particle Swarm Optimization (PSO)	100	500	Inertia Weight: 0.7, c1: 1.5, c2: 1.5, Adaptive Acceleration
JAYA	100	500	Best Solution Update, Worst Solution Elimination, No Explicit Parameter Tuning
Gray Wolf Optimization (GWO)	100	500	Adaptive Hierarchical Coordination, Dynamic Leadership-Based Exploration
Teaching–Learning-Based Optimization (TLBO)	100	500	Teaching Phase Factor: 1.5, Self-Adaptive Student Learning

Gambar 2. 49 Algorithm settings (Hosseina *et al*. 2025)

2. *Particle Swarm Optimization* (PSO)

   PSO terinspirasi dari perilaku kolektif kawanan burung atau ikan dalam mencari sumber makanan. Setiap "partikel" dalam populasi bergerak melalui ruang pencarian dengan kecepatan yang disesuaikan berdasarkan pengalaman pribadi dan tetangganya (Amer *et al*., 2024; Ajiboye *et al*., 2023). Keunggulan utama PSO adalah kecepatan konvergensinya yang tinggi dan komputasi paralel yang efisien, menjadikannya ideal untuk masalah *economic dispatch* yang kompleks (Lee *et al*., 2022; Ajiboye *et al*., 2023).

3. Algoritma Lanjutan (MOMFA dan GWO)

   Penelitian terbaru memperkenalkan algoritma yang lebih canggih seperti *Multi-objective Moth Flame Algorithm* (MOMFA) dan *Grey Wolf Optimization* (GWO)

(El-Bidairi *et al*., 2020; Hosseina *et al*., 2025). MOMFA terbukti memiliki efisiensi energi dan reduksi emisi hingga 12% lebih baik dibandingkan GA dan PSO konvensional (Hosseina *et al*., 2025). Sementara GWO digunakan secara efektif untuk menentukan ukuran BESS yang optimal guna menjaga stabilitas frekuensi pada *Microgrid* mandiri (El-Bidairi *et al*., 2020). Visualisasi performa komparatif antar algoritma ini tersedia pada:

Secara keseluruhan, integrasi antara perangkat lunak simulasi (seperti HOMER) dengan algoritma metaheuristik yang canggih memungkinkan pengembang untuk merancang *Microgrid* yang tidak hanya layak secara ekonomi tetapi juga memiliki ketahanan (*resilience*) tinggi terhadap ketidakpastian sumber daya (Hossain *et al*., 2025; Hosseina *et al*., 2025).

2.3.5 Indikator Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid

Evaluasi dasain dan kinerja teknis sistem *Microgrid* mandiri sangat krusial untuk memastikan bahwa desain sistem mampu memenuhi permintaan beban secara kontinu dengan kualitas daya yang memenuhi standar teknis (Miao *et al*., 2023; Hossain *et al*., 2025). Penggunaan berbagai indikator kinerja memungkinkan perancang untuk menilai efektivitas pemanfaatan sumber daya energi terbarukan, efisiensi konversi daya, serta keandalan pasokan terhadap konsumen (Ajiboye *et al*., 2023; Gholami *et al*., 2023).

2.3.5.1 Penetrasi Energi Terbarukan (Renewable Fraction)

Penetrasi energi terbarukan atau *Renewable Fraction* (RF) didefinisikan sebagai persentase total energi listrik yang disuplai oleh sumber daya terbarukan dibandingkan dengan total konsumsi beban tahunan (Khan *et al*., 2025; Prawitasari *et al*., 2024). Metrik ini menjadi indikator utama keberhasilan program dedieselisasi di wilayah kepulauan (Simatupang *et al*., 2021; Prawitasari *et al*., 2024). Secara matematis, RF dapat dihitung berdasarkan rasio energi dari sumber terbarukan (*Eres*) terhadap total produksi energi (*Etotal*) (Khan *et al*., 2025; Prawitasari *et al*., 2024):

$$RF = \frac{E_{res}}{E_{total}} \times 100\% \quad (2.5)$$

Keterangan komponen:

- RF = *Renewable Fraction* (penetrasi energi terbarukan, dalam %)
- E_{res} = Total energi listrik yang dihasilkan dari sumber terbarukan (kWh/tahun)
- E_{total} = Total energi listrik yang dihasilkan oleh seluruh pembangkit (kWh/tahun)

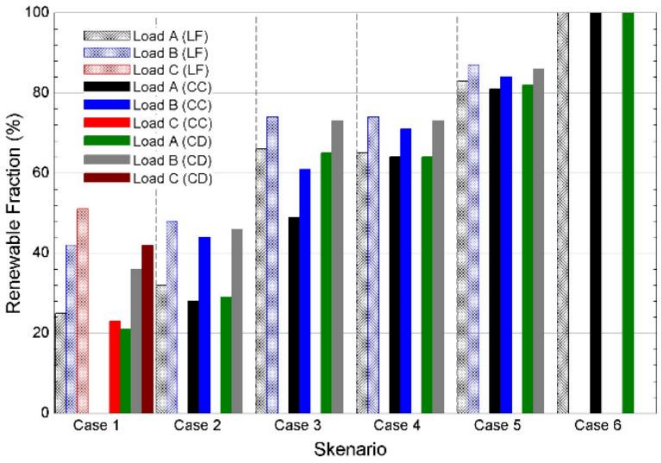
Peningkatan penetrasi energi terbarukan di atas 30% sering dikategorikan sebagai sistem dengan proporsi terbarukan tinggi (*high-proportion renewable energy system*), yang membawa tantangan ketidakpastian dan volatilitas yang lebih besar bagi stabilitas jaringan (Weng *et al*., 2022). Hasil optimasi bauran energi dengan variasi RF yang berbeda dapat divisualisasikan melalui Gambar 2.50 yang membandingkan nilai *Renewable Fraction* (Ren. Frac. %) pada berbagai kombinasi PV, Diesel, dan Baterai.

PV (kW)	Gen. (kW)	Batt. No.	Conv. (kW)	COE ($/kWh)	NPC	Initial capital	Ren. frac. %	Total fuel (L/year)
3.00	0.670	12	1.00	$0.125	$6191	$2450	82.5	220
2.50	0.870	12	1.00	$0.205	$9335	$7451	76.3	273
	0.670			$0.386	$19 038	$201.00	0	1235
	0.670	3	0.0031	$0.390	$19 238	$351.47	0.035	1234
	0.740	3	0.0094	$0.495	$19 855	$647.52	0.022	1798

Note: Gen., generator; Batt., battery; Conv., converter; Ren. Frac., renewable fraction.

Gambar 2. 50 Hasil optimasi yang dikategorikan (terpilih) (Ishraque *et al*. 2021)

Pada Gambar 2.51 menunjukkan grafik hubungan antara variasi beban dengan penetrasi energi terbarukan.



Gambar 2. 51 Grafik variasi beban terhadap parameter RF dari sumber (Prawitasari *et al*. 2024)

2.3.5.2 Efisiensi Sistem dan Manajemen Aliran Daya

Efisiensi sistem mencerminkan seberapa efektif *Microgrid* mengonversi sumber daya primer menjadi energi yang bermanfaat bagi konsumen dengan meminimalkan kerugian (*losses*) selama proses konversi, penyimpanan, dan distribusi (Abirami *et al*., 2025; Hossain *et al*., 2025). Komponen efisiensi ini mencakup efisiensi panel surya (10–22%), efisiensi inverter (umumnya 85–95%), serta efisiensi bolak-balik (*round-trip efficiency*) baterai yang mencapai 95% untuk teknologi Li-ion (Hossain *et al*., 2025; Abirami *et al*., 2025; Simatupang *et al*., 2021). Efisiensi total sistem (η_{total}) dihitung melalui (Abirami *et al*., 2025):

$$\eta_{total} = \frac{E_{output.total}}{E_{available.total}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Keterangan komponen:

- η_{total} = Efisiensi total sistem (dalam %)
- $E_{output.total}$ = Total energi listrik yang berhasil disalurkan ke beban (kWh/tahun)
- $E_{available.total}$ = Total energi primer yang tersedia dari pembangkit (kWh/tahun)

Selain efisiensi perangkat, efisiensi bahan bakar generator diesel juga menjadi parameter kritis, di mana pengoperasian generator pada beban rendah (di bawah 40% kapasitas *rating*) akan menurunkan efisiensi secara drastis (Simatupang *et al*., 2021; Omar *et al*., 2024). Karakteristik efisiensi operasional ini tersedia pada Gambar 2.34 untuk visualisasi peta panas efisiensi baterai sepanjang tahun dan Gambar 2.25 untuk menjelaskan degradasi efisiensi generator pada faktor beban rendah.

2.3.5.3 Indikator Keandalan (LOLP, SAIDI, dan SAIFI)

Keandalan sistem tenaga listrik dalam *Microgrid* diukur melalui kemampuan sistem untuk menyediakan pasokan listrik yang cukup dan berkualitas secara terus-menerus (Nallainathan *et al*., 2025; Gholami *et al*., 2023). Terdapat beberapa metrik utama yang digunakan:

1. *Loss of Load Probability* (LOLP)

   LOLP didefinisikan sebagai probabilitas statistik bahwa kapasitas pembangkitan tidak mampu memenuhi permintaan beban dalam periode waktu tertentu (Sakthivelnathan *et al*., 2024; Weng *et al*., 2022). LOLP sering dinyatakan sebagai rasio jam terjadinya *loss of load* (LOLE) terhadap total jam dalam setahun (Sakthivelnathan *et al*., 2024; Ajiboye *et al*., 2023).

$$LOLP = \frac{LOLE}{T_{total}} \tag{2.7}$$

Keterangan komponen:

- $LOLP$ = *Loss of Load Probability* (nilai antara 0–1, tanpa satuan)
- $LOLE$ = *Loss of Load Expectation* (total jam terjadinya defisit daya dalam setahun, jam/tahun)
- T_{total} = Total jam dalam periode pengamatan (misalnya 8760 jam/tahun)

2. *Expected Energy Not Served* (EENS)

EENS mengukur estimasi jumlah energi (dalam kWh atau MWh) yang tidak dapat terlayani oleh sistem akibat kekurangan kapasitas atau gangguan peralatan (Gholami *et al*., 2023; Sakthivelnathan *et al*., 2024).

$$EENS = \sum_{t \in \text{LOLE}} \left(P_{load}(t) - P_{gen}(t) \right) \times \Delta t \quad (2.8)$$

Keterangan komponen:

- $EENS$ = *Expected Energy Not Served* (kWh/tahun)
- $P_{load}(t)$ = Beban yang diminta pada waktu t (kW)
- $P_{gen}(t)$ = Daya yang mampu dibangkitkan pada waktu t (kW)
- Δt = Interval waktu diskret (biasanya 1 jam)
- Penjumlahan dilakukan selama periode terjadinya *loss of load* (LOLE)

3. SAIDI dan SAIFI

Pemerintah Indonesia menggunakan indeks frekuensi gangguan (*System Average Interruption Frequency Index* - SAIFI) dan indeks durasi gangguan (*System Average Interruption Duration Index* - SAIDI) untuk mengukur aksesibilitas dan keandalan listrik secara nasional (Sulaeman *et al*., 2021; Gholami *et al*., 2023).

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Durasi gangguan setiap pelanggan}}{\text{Jumlah pelanggan yang terlayani}} \quad \text{(jam/pelanggan/tahun)} \quad (2.9)$$

$$SAIFI = \frac{\sum \text{Frekuensi gangguan setiap pelanggan}}{\text{Jumlah pelanggan yang terlayani}} \quad \text{(kali/pelanggan/tahun)} \quad (2.10)$$

Keterangan komponen:

- $SAIDI$ = *System Average Interruption Duration Index* (durasi rata-rata pemadaman per pelanggan)

- *SAIFI = System Average Interruption Frequency Index* (frekuensi rata-rata pemadaman per pelanggan)

Nilai SAIDI dan SAIFI di wilayah terpencil umumnya lebih tinggi dibandingkan area perkotaan akibat hambatan logistik dan teknis (Sulaeman *et al*., 2021).

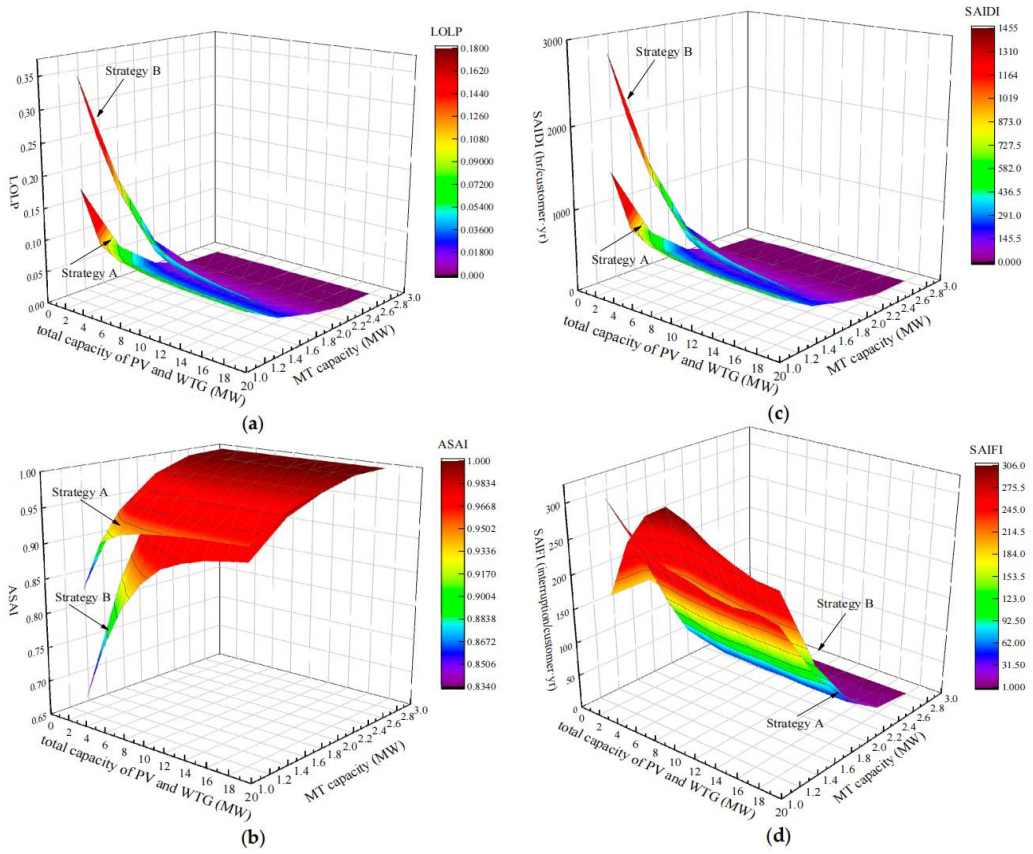
Performa keandalan sistem berdasarkan integrasi BESS dan RES dapat dirujuk pada Gambar 2.52 yang merinci nilai LOLE, EENS, dan MRI (resiliensi) pada berbagai ukuran baterai.

Reliability indices for the first scenario – RES integrated with BESS.

BESS SIZE (kW)	LOLE	EENS	MREAI %	MREEI %	MRI (Th=1h)	MRI (Th=2h)
Without BESS	0.2721	20.6505	89.41	87.41	0.7792	0.8066
10	0.2200	14.2527	86.90	82.62	0.8304	0.8543
20	0.2200	12.4576	86.90	81.10	0.8304	0.8543
40	0.1961	8.6251	85.30	75.56	0.8544	0.8783
60	0.0755	4.2530	63.61	56.06	0.9763	0.9777
80	0.0503	2.8513	47.97	41.70	0.9777	0.9792
100	0.0488	2.6554	45.17	40.51	0.9791	0.9805

Gambar 2. 52 Indeks keandalan untuk skenario pertama – RES terintegrasi dengan BESS (Gholami et al. (2023)

Pada Gambar 2.53 memperlihatkan grafik 3D hubungan antara kapasitas pembangkit dengan indikator LOLP, ASAI, SAIDI, dan SAIFI.



Gambar 2. 53 Indikator keandalan pada berbagai kapasitas PV, WTG, dan mikroturbin (MT) (Weng *et al.* 2022)

2.3.5.4 Faktor Kapasitas Pembangkit (Capacity Factor)

Faktor Kapasitas (*Capacity Factor* - CF) merupakan rasio antara energi listrik aktual yang dihasilkan dalam periode tertentu terhadap energi maksimum yang dapat dihasilkan jika pembangkit beroperasi pada kapasitas nominal secara terus-menerus (Abirami *et al*., 2025; Hossain *et al*., 2025). CF sangat bergantung pada ketersediaan sumber daya alam lokal; misalnya, turbin angin di lokasi tertentu mungkin hanya memiliki CF sebesar 8,18% (Hossain *et al*., 2025). Nilai CF yang tinggi menunjukkan pemanfaatan aset yang lebih efisien (Abirami *et al*., 2025). Persamaan dasar CF adalah (Abirami *et al*., 2025):

$$CF = \frac{E_{aktual}}{E_{rated}} \times 100\% \quad (2.11)$$

Keterangan komponen:

- CF = *Capacity Factor* (faktor kapasitas, dalam %)
- E_{aktual} = Energi listrik aktual yang dihasilkan dalam periode tertentu (kWh)
- E_{rated} = Energi maksimum teoritis jika pembangkit beroperasi pada daya terpasang penuh selama periode yang sama (kWh), dihitung sebagai $E_{rated} = P_{rated} \times T$, dengan P_{rated} = daya terpasang (kW) dan T = jumlah jam dalam periode.

Data mengenai perbandingan faktor kapasitas antar teknologi pembangkit tersedia pada Gambar 2.18 sebelumnya.

2.4 Studi Terdahulu tentang *Microgrid* di Pulau/Kepulauan

Implementasi *Microgrid* di Indonesia telah berkembang secara signifikan sebagai bagian dari upaya pemerintah untuk mencapai target bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 (Simatupang *et al*., 2021; Sulaeman *et al*., 2021). Karakteristik Indonesia sebagai negara kepulauan menjadikan sistem energi mandiri berskala kecil sebagai solusi yang paling layak dibandingkan dengan perluasan jaringan jala-jala nasional (*super-grid*) yang terkendala biaya investasi tinggi dan tantangan geografis (Sulaeman *et al*., 2021; Simatupang *et al*., 2021).

2.4.1 Implementasi *Microgrid* di Indonesia

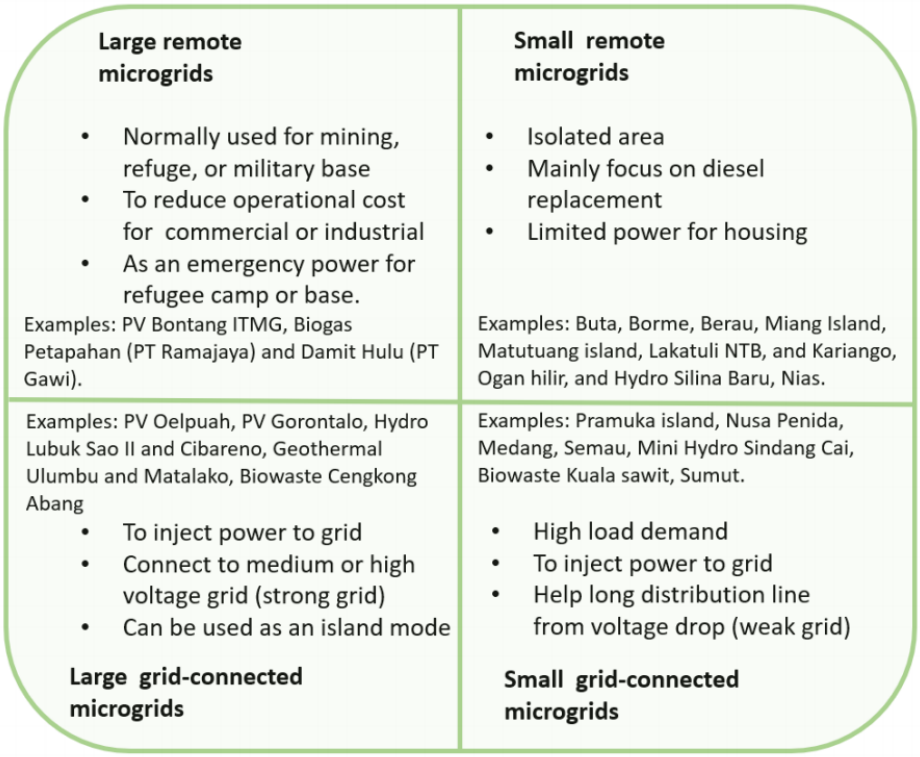
2.4.1.1 Tinjauan Proyek di Maluku dan Maluku Utara (MMU)

Studi komprehensif pada wilayah Maluku dan Maluku Utara mengidentifikasi 101 *Microgrid* mandiri dari total 104 jala-jala listrik yang ada, di mana mayoritas masih bergantung pada generator diesel (DiG) (Sulaeman *et al*., 2021). Investigasi terhadap 15 situs *Microgrid* PV dan hibrida di wilayah ini menunjukkan bahwa rata-rata masa

operasional sistem hanya mencapai 4,3 tahun jauh di bawah umur teknis yang diharapkan (Simatupang *et al*., 2021; Sulaeman *et al*., 2021).

1. Konfigurasi Sistem

   Kapasitas PV yang terpasang bervariasi antara 75 kWp hingga 600 kWp, yang umumnya dikonfigurasi secara hibrida dengan generator diesel dan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) (Simatupang *et al*., 2021). Sebagai contoh, Situs 7 menggunakan PV 200 kWp dengan diesel 880 kW dan baterai OPzS 384 kWh (Simatupang *et al*., 2021). Klasifikasi ukuran dan karakteristik operasional *Microgrid* di Indonesia secara visual dapat Anda rujuk pada Gambar 2.54 yang mengelompokkan sistem menjadi empat kategori utama: *Large remote Microgrids*, *Small remote Microgrids*, *Large grid-connected Microgrids*, dan *Small grid-connected Microgrids*, lengkap dengan contoh lokasi implementasinya di Indonesia.



Gambar 2. 54 Klasifikasi dan karakteristik utama mikrogrid di Indonesia (Simatupang *et al*. 2021)

2. Kendala Operasional

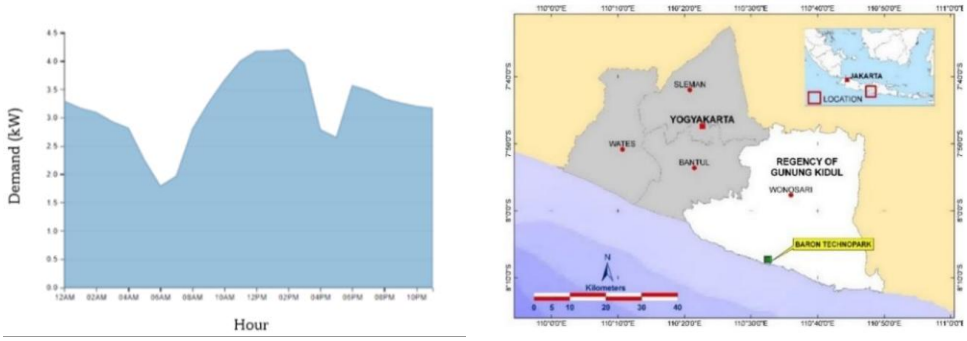
   Kegagalan dini pada situs-situs ini didominasi oleh kerusakan baterai dan inverter (Simatupang *et al*., 2021). Masalah utama meliputi peramalan beban yang tidak akurat (seperti pada Situs 1 yang bebannya berlipat ganda dalam 3 tahun), sistem sakelar manual yang tidak efisien (Situs 14), hingga kurangnya standar pemeliharaan rutin (*O&M*) (Simatupang *et al*., 2021; Sulaeman *et al*., 2021). Dampak nyata dari peramalan beban yang buruk terhadap kerusakan fisik baterai dapat dilihat pada Gambar 2.5 sebelumnya yang mendokumentasikan bagaimana lonjakan beban puncak dari 3,5 kW menjadi 6,5 kW dalam tiga tahun mengakibatkan kerusakan pada 16 unit baterai karena laju pengosongan (*discharge rate*) yang berlebihan.

2.4.1.2 Optimalisasi Microgrid di Baron Technopark (BTP), Yogyakarta

Baron Technopark berfungsi sebagai pusat penelitian dan pengembangan energi terbarukan yang secara spesifik menargetkan solusi untuk wilayah 3T di Indonesia (Prawitasari *et al*., 2024). Studi optimasi dilakukan untuk meningkatkan efisiensi operasional sistem eksisting yang awalnya didominasi oleh energi surya (Prawitasari *et al*., 2024).

1. Konfigurasi Optimal

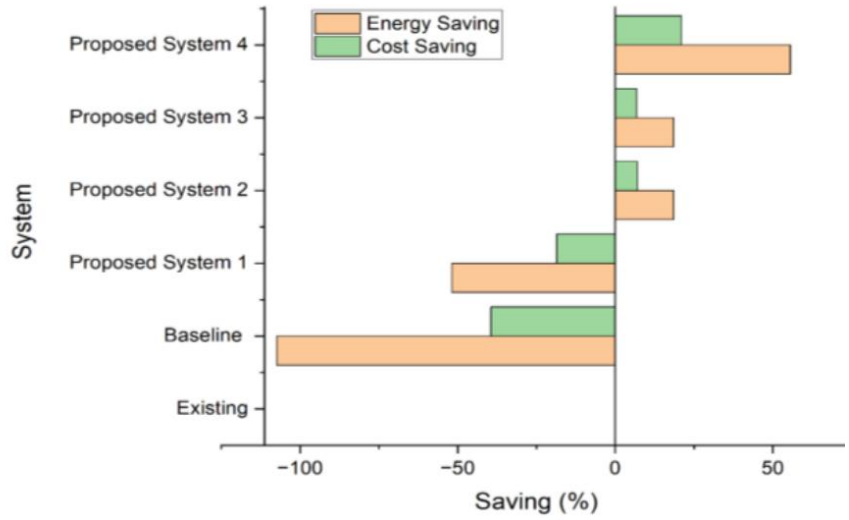
   Berdasarkan analisis menggunakan perangkat lunak HOMER, konfigurasi paling optimal untuk BTP terdiri dari PV 24 kWp, BESS 288 kWh, dan generator diesel 25 kVA dengan strategi *Load Following* (LF) (Prawitasari *et al*., 2024). Penambahan diesel generator terbukti meningkatkan keandalan sistem dibandingkan hanya menggunakan PV dan baterai saja (Prawitasari *et al*., 2024). Lokasi dan profil beban harian BTP ini tersedia pada Gambar 2.55 yang menggambarkan letak geografis fasilitas di Gunung Kidul, Yogyakarta, serta variasi kebutuhan daya harian yang menjadi basis optimasi sistem hibrida.



Gambar 2. 55 Lokasi Baron Technopark dan Profil Beban Harian BTP (Prawitasari *et al*. (2024)

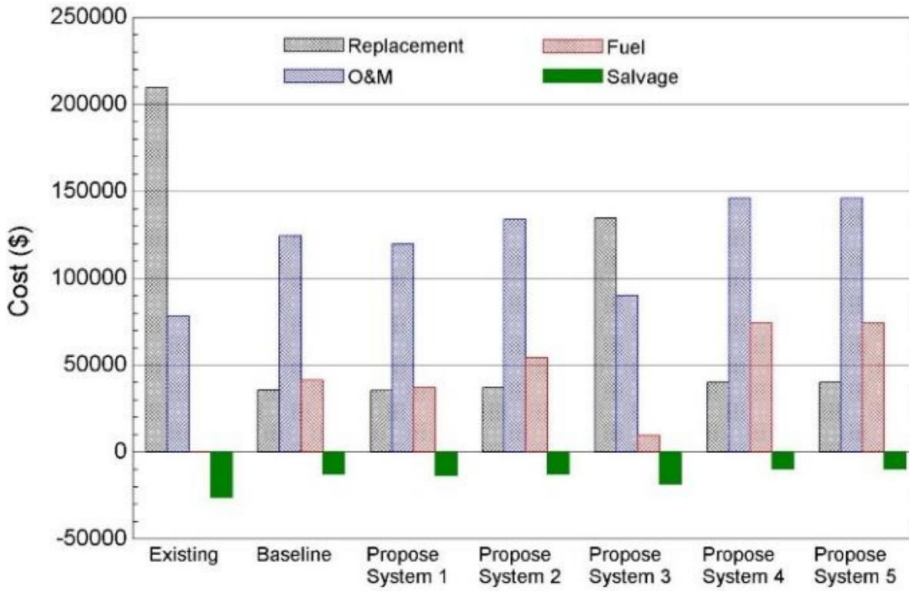
2. Hasil Keekonomian

Sistem hibrida yang diusulkan mencapai *Net Present Cost* (NPC) sebesar $250.478 dengan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) sebesar $0,28/kWh (Prawitasari *et al*., 2024). Meskipun sistem ini mampu mereduksi emisi CO2 sebesar 13,25 ton per tahun, nilai *Benefit-Cost Ratio* (BCR) tercatat sebesar 0,89, yang menunjukkan tantangan profitabilitas di daerah pedesaan akibat tingginya biaya baterai (Prawitasari *et al*., 2024). Struktur biaya dan perbandingan efisiensi ini dirangkum dalam Gambar 2.56 yang menyajikan analisis komparatif mengenai efektivitas berbagai skenario sistem usulan dalam mereduksi kerugian energi dan meminimalisir biaya operasional, di mana hasil optimasi menunjukkan potensi penghematan energi hingga 55,56% dan penghematan biaya total sebesar 20,95% dibandingkan dengan sistem eksisting yang hanya mengandalkan PV dan baterai.



Gambar 2. 56 Perbandingan penghematan energi dan biaya (Prawitasari *et al*. 2024)

Sebagai tambahan untuk detail Struktur Biaya (CAPEX/OPEX) dapat dilihat pada Gambar 2.57 yang merinci perbandingan biaya penggantian (*replacement*), operasional dan pemeliharaan (*O&M*), bahan bakar, serta nilai residu (*salvage*) untuk setiap skenario sistem yang dievaluasi.



Gambar 2. 57 Perbandingan biaya penggantian, operasi dan pemeliharaan, bahan bakar, dan nilai sisa (Prawitasari *et al*. 2024)

2.4.1.3 Studi di Pulau Miangas dan Wilayah Kepulauan Terluar

Pulau Miangas, sebagai salah satu pulau terdepan di perbatasan utara Indonesia, menjadi subjek studi tekno-ekonomi yang menunjukkan LCOE sistem hibrida PV-Diesel sebesar $0,318/kWh (Khan *et al*., 2025). Angka ini membuktikan bahwa meskipun biaya di pulau terpencil lebih tinggi dibandingkan di daratan utama, integrasi energi terbarukan tetap jauh lebih ekonomis daripada pengoperasian diesel murni yang biayanya dapat membengkak akibat logistik bahan bakar (Khan *et al*., 2025; Miao *et al*., 2023).

2.4.1.4 Implementasi di Syiah Kuala University, Aceh

Meskipun bersifat *grid-connected*, sistem di Aceh ini memberikan gambaran mengenai integrasi skala besar (682 kW PV dan 100 kW Angin) di ujung Pulau Sumatra (Riayatsyah *et al*., 2022). Studi ini menunjukkan bahwa dengan koneksi ke jala-jala, LCOE dapat ditekan hingga $0,0446/kWh (Riayatsyah *et al*., 2022). Hambatan utama yang diidentifikasi adalah harga listrik PLN yang masih rendah (disubsidi batu bara), sehingga investasi mandiri pada energi terbarukan seringkali dianggap kurang menarik secara finansial tanpa insentif kebijakan (Riayatsyah *et al*., 2022).

2.4.1.5 Ringkasan Tantangan Multidimensional

Dari berbagai studi kasus di Indonesia, kendala implementasi diklasifikasikan ke dalam enam dimensi: institusional (ketidakjelasan tanggung jawab), sosial (status lahan dan vandalisme), teknis (kurangnya keahlian lokal), ekonomi (biaya penggantian baterai yang tinggi), lingkungan (paparan kelembapan dan suhu tropis), serta kebijakan (regulasi yang belum mendukung sektor swasta secara maksimal) (Sulaeman *et al*., 2021; Simatupang *et al*., 2021). Matriks tantangan yang sangat relevan dengan konteks Indonesia ini dapat dilihat pada Tabel 2.1 sebelumnya sebagai ringkasan kritis untuk menutup sub-bab ini.

Tabel 2. 2 Matriks Komparatif Studi Terdahulu *Microgrid* Kepulauan dan Posisi Penelitian Ini

Peneliti & Tahun	Lokasi Studi	Metode Optimasi / Alat	Konfigurasi Sistem Utama	Titik Awal Sistem	Fokus Khusus / Keterbatasan
El-Bidairi *et al*. (2020)	Flinders Island, Aus	GWO, DigSILENT	PLTD, PLTB, BESS	*Greenfield* (Desain Baru)	Stabilitas Frekuensi Dinamis (Inersia Virtual)
Kanaga Bharathi *et al*. (2025)	Umum (Simulasi)	Simulasi Iteratif	Geotermal, PLTB, PLTS, H_2	*Greenfield*	Produksi H_2, Efisiensi Eksergi Tinggi
Hartmann *et al*. (2020)	Fót, Hongaria	MS Excel, NPV	PLTS, Mikrohidro, BESS/Diesel	*Brownfield* (Eksisting)	Studi Kasus Real SCADA, *Demand Side Management*
Hosseina *et al*. (2025)	Simulasi 33/69 Bus	MISOCP, MOMFA	PV, Angin, DG, EV, H_2	*Greenfield*	Resiliensi Ekstrem, *Vehicle-to-Grid* (V2G)
Hossain *et al*. (2025)	Umum (Simulasi)	MATLAB, HOMER	PLTB, PLTS, BESS	*Greenfield*	Kontrol Droop & Impedansi Virtual
Ishraque *et al*. (2022)	4 Wilayah Bangladesh	HOMER Pro, MATLAB	PV, Angin, BESS, Diesel	*Greenfield*	Perbandingan Strategi Dispatch (LF vs CC vs CD)
Ishraque *et al*. (2023)	Sekolah Terpencil BD	HOMER Pro	PV, BESS, Diesel	*Greenfield*	Analisis Multi-Tahun, Lokasi Spesifik Terisolasi
Lee *et al*. (2022)	FOB Timur Tengah	MILP	Generator 60kW, ESS 25kWh	*Brownfield* (Eksisting)	Penalti Fluktuasi Beban pada Generator Diesel

Energy (2023)	Yongxing Island, CN	HOMER + MCDM	Angin (dominan), PV, DG, H_2	*Greenfield*	Multi-Energi (Listrik, Termal, H_2), Indikator Kemandirian
Penelitian Ini (2026)	Pulau Bunaken, ID	HOMER Pro + PLS-SEM	Optimasi Eksisting: PLTD 695 kW + PLTS 286,7 kWp + BESS Konvensional 540 kWh	*Brownfield* Terbatas (Hybrid Eksisting)	Optimalisasi Sistem *Brownfield* Menuju Dedieselisasi Penuh; Integrasi Analisis Jalur Sosial-Teknis; Sensitivitas Kebijakan Subsidi BBM

2.4.2 Pembelajaran dari Proyek Dedieselisasi Global

Transisi dari sistem berbasis diesel murni menuju *Microgrid* hibrida terbarukan telah menjadi agenda global untuk menekan biaya produksi listrik di wilayah terpencil yang bisa mencapai dua puluh kali lipat dibandingkan harga di daratan utama (Miao *et al*., 2023). Pembelajaran dari berbagai proyek dedieselisasi global menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi tidak hanya bergantung pada ketersediaan sumber daya alam, tetapi juga pada strategi pengendalian teknis, manajemen beban, dan skema pembiayaan yang berkelanjutan (Omar *et al*., 2024; El-Bidairi *et al*., 2020).

2.4.2.1 Studi Kasus Maladewa (Maldives): Efisiensi Ekonomi Sektor Pariwisata

Maladewa merupakan salah satu negara kepulauan yang paling progresif dalam mengadopsi *Hybrid Renewable Energy Systems* (HRES) untuk mengurangi ketergantungan pada diesel impor yang mahal (Khan *et al*., 2025). Proyek dedieselisasi di Maladewa sering difokuskan pada sektor resor wisata yang memiliki profil beban stabil namun berbiaya energi tinggi.

1. Keberhasilan

   Studi menunjukkan bahwa penggunaan perangkat lunak optimasi seperti HOMER Pro memungkinkan resor di Maladewa merancang konfigurasi PV-Diesel-Baterai yang paling layak secara ekonomi (Khan *et al*., 2025; Ishraque *et al*., 2022). Integrasi ini terbukti menurunkan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) secara signifikan dibandingkan operasional generator murni (Khan *et al*., 2025).

2. Faktor Penentu

   Keberhasilan di Maladewa didorong oleh kemauan investasi sektor swasta dan kebijakan pemerintah yang mendukung pengurangan emisi karbon di sektor pariwisata. Perbandingan biaya energi ini dapat dilihat pada rangkuman LCOE global pada Gambar 2.26 Sebelumnya yang menyajikan data komparatif biaya energi (USD/kWh) dari berbagai konfigurasi sistem hibrida di berbagai negara seperti Ghana, Malaysia, Australia, hingga India dalam rentang tahun 2012–2024

2.4.2.2 Studi Kasus Flinders Island, Australia: Stabilitas Frekuensi

Proyek *Microgrid* di Flinders Island, Australia, memberikan pelajaran penting mengenai aspek teknis stabilitas jaringan pada sistem dengan penetrasi energi terbarukan yang sangat tinggi (El-Bidairi *et al*., 2020).

1. Tantangan

   Masalah utama yang dihadapi adalah fluktuasi frekuensi yang ekstrem akibat intermitensi angin dan surya, mengingat sistem otonom memiliki inersia yang sangat rendah (El-Bidairi *et al*., 2020).

2. Solusi

   Penggunaan algoritma optimasi tingkat lanjut, seperti *Grey Wolf Optimization* (GWO), diterapkan untuk menentukan ukuran sistem penyimpanan energi baterai (BESS) yang tepat guna kontrol frekuensi dinamis (El-Bidairi *et al*., 2020). Strategi kontrol ini memastikan sistem tetap stabil meskipun terjadi perubahan mendadak pada sumber daya alam. Alur logika optimasi yang digunakan di

Flinders Island menerapkan tahapan sistematis algoritma *Grey Wolf Optimization* (GWO) dalam menentukan ukuran BESS yang optimal untuk stabilitas frekuensi jaringan.

2.4.2.3. Kepulauan Pasifik (Kiribati) dan Azores (Corvo Island): Hambatan Lahan dan Logistik

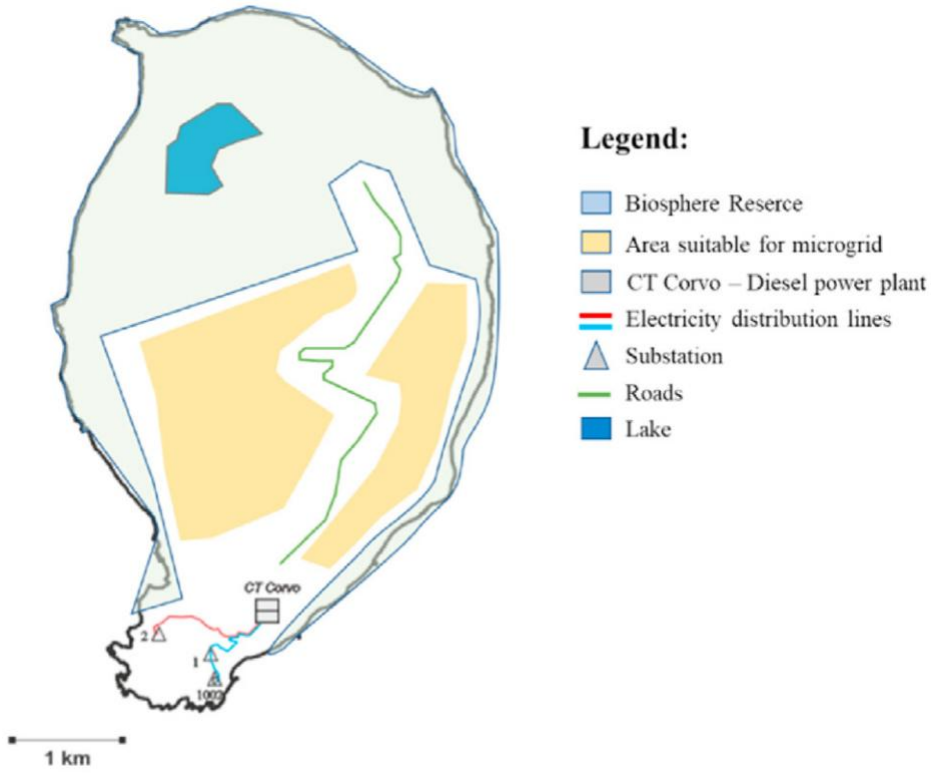
Wilayah kepulauan Pasifik seperti Kiribati dan Kepulauan Azores di Portugal menghadapi tantangan geografis yang serupa dengan wilayah 3T di Indonesia, yaitu isolasi ekstrem dan keterbatasan lahan produktif (Gomes *et al*., 2021; Ajiboye *et al*., 2023).

1. Isu Spesifik

   Di Corvo Island (Azores), sekitar 70% lahan ditetapkan sebagai cagar alam atau pemukiman padat, sehingga penempatan panel surya dan turbin angin harus dilakukan dengan sangat hati-hati agar tidak mengganggu ekosistem lokal (Gomes *et al*., 2021).

2. Faktor Kegagalan/Kendala

   Kegagalan sering terjadi jika perencanaan tidak mempertimbangkan "land-use constraints" atau keterbatasan area. Selain itu, biaya logistik untuk pemeliharaan komponen di Pasifik sangat tinggi, sehingga sistem yang terlalu kompleks tanpa dukungan teknisi lokal sering kali berakhir terbengkalai (Gomes *et al*., 2021; Ajiboye *et al*., 2023). Peta kendala lahan ini divisualisasikan dalam Gambar 2.58 yang memetakan area yang tersedia untuk pengembangan energi terbarukan di Corvo Island dengan mempertimbangkan batasan wilayah cagar biosfer dan pemukiman penduduk.



Gambar 2. 58 Peta Pulau Corvo yang menyoroti area yang tersedia untuk pengembangan mikrogrid (Gomes *et al*. 2021)

2.4.2.4 Faktor Keberhasilan dan Kegagalan Global

Berdasarkan tinjauan berbagai proyek global, faktor-faktor utama yang memengaruhi keberlanjutan proyek dedieselisasi adalah sebagai berikut:

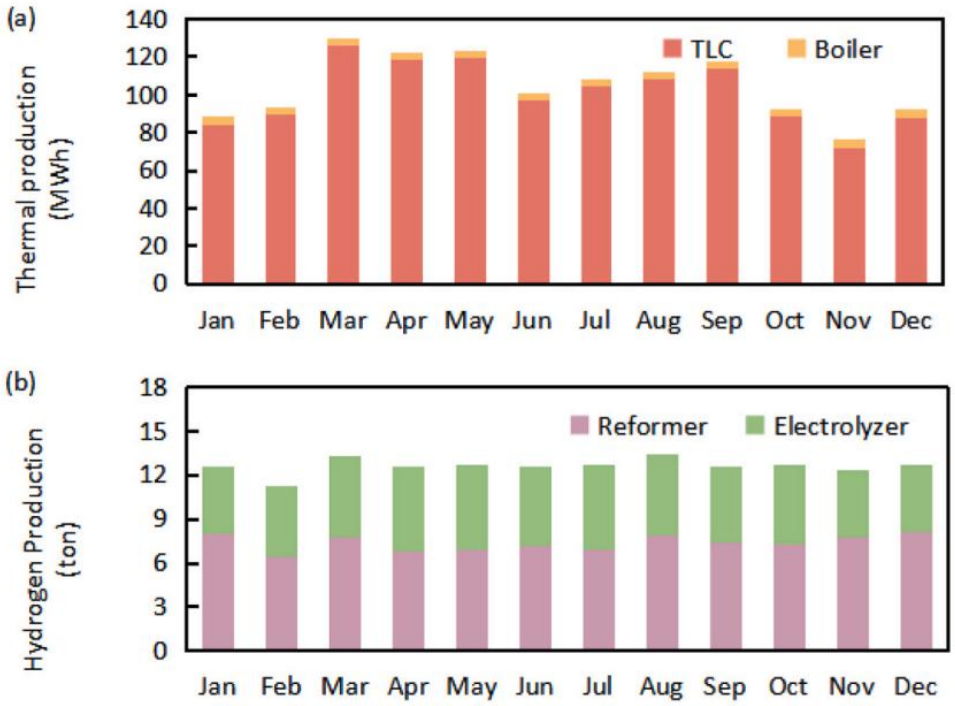
1. Faktor Keberhasilan:

- Komplementaritas Sumber Daya

  Menggabungkan lebih dari satu jenis energi terbarukan (misalnya PV dan Angin) untuk mengurangi kebutuhan penyimpanan baterai yang mahal (Żołądek *et al*., 2022; Miao *et al*., 2023).

- Resiliensi dan Fleksibilitas

Kemampuan sistem untuk bertahan dan pulih dari gangguan cuaca ekstrem melalui redundansi sumber daya dan penyimpanan hidrogen atau baterai yang memadai (Miao *et al*., 2023; Hosseina *et al*., 2025). Integrasi multi-energi (listrik, termal, hidrogen) terbukti meningkatkan ketahanan sistem kepulauan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.59 yang menampilkan profil produksi bulanan energi termal dan hidrogen yang saling melengkapi untuk menjamin keberlangsungan pasokan energi di Yongxing Island.



Gambar 2. 59 Produksi termal (a) dan hidrogen (b) bulanan (Miao *et al*. 2023)

2. Faktor Kegagalan:

- Biaya Investasi Awal (CAPEX) Tinggi

  Banyak komunitas rural gagal melakukan transisi karena fokus hanya pada biaya awal tanpa mempertimbangkan penghematan operasional jangka panjang (Omar *et al*., 2024; Odetoye *et al*., 2023).

- Kurangnya Pemeliharaan (O&M)

  Tanpa standar prosedur O&M yang jelas dan pelatihan personel lokal, komponen canggih seperti inverter dan baterai Li-ion akan mengalami degradasi dini (Simatupang *et al*., 2021; Sulaeman *et al*., 2021).

- Peramalan Beban yang Buruk

  Lonjakan permintaan yang tidak terprediksi sering kali membuat sistem mengalami *overload*, yang merusak baterai secara permanen (Simatupang *et al*., 2021).

2.4.3 Research Gap dan Posisi Penelitian

Berdasarkan kajian terhadap penelitian terdahulu mengenai optimasi microgrid, sistem energi hibrida, serta dedieselisasi pada wilayah kepulauan, ditemukan bahwa penelitian-penelitian sebelumnya telah memberikan kontribusi penting dalam menentukan konfigurasi pembangkit yang ekonomis dan meningkatkan penetrasi energi terbarukan. Namun, masih terdapat sejumlah kesenjangan yang relevan dengan kondisi sistem kelistrikan Pulau Bunaken. Kesenjangan tersebut dapat dikelompokkan menjadi tiga aspek utama, yaitu kesenjangan objek optimasi, kesenjangan metodologis, dan kesenjangan pengambilan keputusan sosio-teknis.

2.4.3.1 Kesenjangan Objek Optimasi: Greenfield versus Brownfield

Sebagian besar penelitian optimasi microgrid dilakukan dengan pendekatan **greenfield**, yaitu membentuk konfigurasi sistem berdasarkan pilihan teknologi dan kapasitas baru untuk memperoleh Net Present Cost (NPC) atau Levelized Cost of Electricity (LCOE) minimum. Pendekatan tersebut sesuai untuk sistem yang belum memiliki infrastruktur pembangkitan, tetapi tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi banyak sistem kelistrikan kepulauan di Indonesia yang telah memiliki PLTD, PLTS, inverter, dan sistem penyimpanan energi yang telah beroperasi.

Kondisi Pulau Bunaken berbeda karena sistem yang dianalisis merupakan sistem brownfield. Infrastruktur PLTD, PLTS, BESS, dan inverter telah tersedia, tetapi sebagian aset belum beroperasi pada kinerja optimal. Oleh karena itu, persoalan penelitian bukan semata-mata menentukan kapasitas sistem baru dari nol, tetapi menentukan sejauh mana aset eksisting harus dipertahankan, direvitalisasi, dioptimalkan strategi operasinya, atau ditambah kapasitasnya agar dapat menghasilkan transisi menuju dedieselisasi dengan biaya yang lebih rasional.

Dengan demikian, terdapat practical-object gap antara pendekatan greenfield yang dominan dalam studi optimasi microgrid dengan kebutuhan optimasi aset eksisting yang telah tertanam pada sistem kelistrikan pulau kecil.

2.4.3.2 Kesenjangan Metodologis: Optimasi Tekno-Ekonomi Belum Menjelaskan Hubungan Antar Faktor

HOMER Pro telah banyak digunakan untuk mengevaluasi konfigurasi sistem energi hibrida melalui indikator seperti NPC, LCOE, konsumsi bahan bakar, produksi energi, penetrasi energi terbarukan, dan emisi. Pendekatan tersebut efektif untuk menjawab pertanyaan "konfigurasi mana yang memberikan hasil terbaik?", tetapi hasil simulasi pada umumnya belum menjelaskan secara statistik bagaimana dan melalui jalur apa faktor teknis, keekonomian, serta lingkungan-sosial saling berkaitan dalam membentuk keputusan optimalisasi.

Dalam sistem energi nyata, keputusan investasi dan dedieselisasi tidak hanya ditentukan oleh satu parameter. Perubahan dasain dan kinerja teknis dapat memengaruhi konsumsi BBM dan biaya sistem; perubahan keekonomian selanjutnya memengaruhi daya tarik suatu konfigurasi; sementara faktor lingkungan dan sosial dapat memengaruhi penerimaan terhadap alternatif sistem yang dipilih.

Oleh karena itu, terdapat methodological gap berupa belum terintegrasinya optimasi tekno-ekonomi berbasis simulasi dengan analisis hubungan struktural antarvariabel dalam satu kerangka penelitian. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut

melalui integrasi HOMER Pro dengan Partial Least Squares–Structural Equation Modeling (PLS-SEM). HOMER Pro digunakan untuk memperoleh performa kuantitatif setiap konfigurasi, sedangkan PLS-SEM digunakan untuk menguji hubungan antara Keekonomian Sistem Microgrid (X1), Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid (X2), Lingkungan dan Sosial (X3), serta Optimalisasi Model Microgrid (Y).

2.4.3.3 Kesenjangan Pengambilan Keputusan Sosio-Teknis pada Kawasan Konservasi

Sebagian besar studi optimasi energi hibrida berorientasi pada pencapaian biaya minimum dan keandalan teknis. Namun, pada kawasan konservasi dan destinasi ekowisata seperti Pulau Bunaken, konfigurasi yang paling ekonomis belum tentu merupakan konfigurasi yang paling diterima oleh masyarakat dan pemangku kepentingan.

Operasi pembangkit diesel memiliki konsekuensi berupa konsumsi BBM, emisi, kebisingan, serta ketergantungan logistik yang perlu dipertimbangkan bersamaan dengan biaya investasi energi terbarukan. Selain itu, status Pulau Bunaken sebagai kawasan Taman Nasional menjadikan preferensi terhadap lingkungan bersih dan sistem energi rendah emisi sebagai bagian penting dalam proses pengambilan keputusan. Dengan demikian, terdapat socio-technical decision gap, yaitu terbatasnya penelitian yang secara bersamaan membandingkan optimalitas teknis-ekonomi dengan dimensi lingkungan dan penerimaan sosial pada proses dedieselisasi sistem kelistrikan pulau kecil yang berada di kawasan konservasi.

2.4.3.4 Posisi dan Kebaruan Penelitian Ini

Berdasarkan ketiga kesenjangan tersebut, penelitian ini diposisikan sebagai kajian optimasi brownfield microgrid berbasis mixed-method sekuensial eksplanatori untuk mendukung dedieselisasi Pulau Bunaken. Posisi penelitian dapat dirumuskan dalam tiga karakteristik utama. Pertama, unit optimasi bukan sistem baru, tetapi sistem hybrid eksisting PLTD–PLTS–BESS sehingga aset yang telah tertanam menjadi titik awal

pengambilan keputusan. Kedua, evaluasi tidak berhenti pada penentuan konfigurasi dengan NPC atau LCOE terendah, tetapi dilanjutkan dengan PLS-SEM untuk menjelaskan hubungan antara dimensi teknis, keekonomian, serta lingkungan-sosial. Ketiga, rekomendasi akhir tidak diarahkan pada penggantian PLTD secara langsung, tetapi pada penentuan jalur transisi bertahap yang mempertimbangkan keekonomian, keandalan, kesiapan teknologi, dan penerimaan pemangku kepentingan. Dengan posisi tersebut, penelitian ini berupaya menjembatani kesenjangan antara optimasi teknologi, pengelolaan aset eksisting, dan pengambilan keputusan sosio-teknis dalam proses dedieselisasi sistem kelistrikan pulau kecil.

2.5 Kerangka Teori dan Model Analisis

Penyusunan kerangka teori dalam penelitian ini didasarkan pada sintesis antara teori transisi energi di wilayah kepulauan, prinsip keekonomian teknik (engineering economy), teori optimasi sistem energi hibrida, dan pendekatan sistem sosio-teknis (socio-technical system). Kerangka ini menjadi landasan konseptual untuk membangun model analisis yang mengintegrasikan dimensi teknis, ekonomi, sosial-lingkungan, dan optimalisasi sistem dalam konteks optimalisasi sistem brownfield menuju dedieselisasi penuh.

2.5.1 Landasan Teori Transisi Energi di Wilayah Kepulauan

Konsep dedieselisasi yang diusung dalam tesis ini berakar pada Teori Transisi Sosio-Teknis (Socio-Technical Transition Theory) yang dikembangkan oleh Geels (2002) melalui perspektif *Multi-Level Perspective* (MLP). Dalam konteks Pulau Bunaken, interaksi tiga level dalam MLP dapat diidentifikasi sebagai berikut:

1. Tekanan global terhadap dekarbonisasi sektor energi, komitmen Indonesia dalam *Paris Agreement* untuk menurunkan emisi gas rumah kaca, volatilitas harga minyak mentah dunia, serta kebijakan nasional percepatan energi terbarukan di daerah Tertinggal, Terdepan, dan Terluar (3T) melalui Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik.

2. Dominasi sistem PLTD eksisting yang didukung oleh struktur logistik BBM bersubsidi dan infrastruktur pembangkitan yang telah beroperasi selama bertahun-tahun. Rezim ini memiliki *lock-in mechanism* berupa ketergantungan pada pasokan BBM dari Manado dan tarif listrik yang disubsidi negara, sehingga menciptakan disinsentif bagi investasi energi terbarukan murni.
3. Kehadiran sistem PLTS 286,7 kWp dan BESS konvensional 540 kWh yang telah terpasang dan beroperasi di Bunaken merupakan wujud nyata dari inovasi niche yang mulai menggerogoti dominasi rezim diesel. Namun, tingkat penetrasi energi terbarukan saat ini belum optimal. Tesis ini berfokus pada bagaimana mendorong *niche* ini agar dapat berkembang menuju dedieselisasi penuh melalui optimalisasi teknis dan penguatan penerimaan sosial.

Transisi dari rezim diesel menuju *niche Microgrid* tidak terjadi secara linier, melainkan melalui proses *co-evolution* antara inovasi teknologi, perubahan preferensi sosial, dan insentif ekonomi (Geels, 2011). Oleh karena itu, kerangka teori dalam penelitian ini memandang sistem energi Bunaken sebagai Sistem Adaptif Kompleks (Complex Adaptive System) di mana keputusan teknis (optimalisasi kapasitas PLTS/BESS, strategi *dispatch*) saling memengaruhi dan dipengaruhi oleh persepsi ekonomi (LCOE/NPV) serta penerimaan sosial masyarakat lokal.

2.5.2 Teori Keekonomian Teknik (*Engineering Economy*) untuk Sistem Energi

Analisis keekonomian dalam penelitian ini mengacu pada Teori Biaya Siklus Hidup (Life Cycle Cost - LCC) dan Teori Portofolio Investasi Energi. Menurut Short *et al*. (1995) dalam *Manual of Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies*, evaluasi proyek energi harus mempertimbangkan seluruh komponen biaya dari tahap perencanaan, investasi awal, operasi dan pemeliharaan, hingga dekomisioning. Variabel-variabel ekonomi yang diadopsi dalam penelitian ini (CAPEX, OPEX, LCOE, NPV) merupakan turunan langsung dari prinsip Time Value of Money dan Risk-Adjusted Discount Rate.

Khusus untuk sistem *Microgrid*, pendekatan Levelized Cost of Electricity (LCOE) menjadi metrik standar untuk membandingkan biaya per kWh antara sistem

PLTD eksisting dan alternatif EBT. Secara matematis, LCOE didefinisikan sebagai rasio antara total biaya siklus hidup yang didiskontokan terhadap total produksi energi listrik yang didiskontokan (Branker *et al*., 2011):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (2.12)$$

di mana:

- I_t = Biaya investasi tahun ke-t (CAPEX)
- M_t = Biaya operasi dan pemeliharaan tahun ke-t (OPEX)
- F_t = Biaya bahan bakar tahun ke-t
- E_t = Produksi energi listrik tahun ke-t (kWh)
- r = Tingkat diskonto
- n = Umur proyek (dalam penelitian ini 25 tahun)

Teori ini menjadi dasar untuk mengukur Keekonomian Sistem Microgrid (X1) sebagai variabel laten dalam model analisis jalur. Indikator-indikator yang membentuk konstruk ini meliputi CAPEX, OPEX, LCOE, NPV,.

2.5.3 Teori Optimasi Sistem Energi Hibrida

Pemodelan optimasi *Microgrid* dalam penelitian ini didasarkan pada Teori Optimasi Stokastik Multi-Objektif (Multi-Objective Stochastic Optimization) . Sistem *Microgrid* di pulau terpencil menghadapi dua sumber ketidakpastian utama: (1) intermittensi sumber energi terbarukan (radiasi matahari), dan (2) fluktuasi beban

konsumen, terutama dari sektor pariwisata yang bersifat musiman. Model optimasi harus memenuhi fungsi tujuan ganda (*dual objective function*):

1. Minimasi Biaya Sistem: $\min \sum(C_{invest} + C_{O\&M} + C_{fuel} + C_{emission})$
2. Maksimasi Keandalan: min LOLP atau max Renewable Fraction

Batasan (*constraints*) yang berlaku meliputi keseimbangan daya (*power balance*), batas teknis operasi baterai (*State of Charge* minimal dan maksimal), serta batas emisi karbon sesuai status Taman Nasional Bunaken.

Untuk menyelesaikan permasalahan optimasi ini, penelitian ini menggunakan perangkat lunak HOMER Pro yang menerapkan algoritma *proprietary derivative-free optimization* untuk menemukan konfigurasi optimal dari ribuan kemungkinan kombinasi sistem. Prinsip kerja HOMER didasarkan pada simulasi *time-series* satu tahun penuh dengan langkah waktu 60 menit, kemudian menghitung nilai *Net Present Cost* (NPC) untuk setiap konfigurasi yang memenuhi batasan keandalan (Lambert *et al*., 2006).

Berbeda dengan sebagian besar studi terdahulu yang mengasumsikan perancangan dari nol (*greenfield*), penelitian ini menerapkan pendekatan optimasi *brownfield*. Artinya, komponen-komponen eksisting (PLTD 695 kW, PLTS 286,7 kWp, BESS konvensional 540 kWh, inverter 200 kW) diperlakukan sebagai aset tetap (*sunk cost*) yang sudah tertanam. Fungsi optimasi tidak lagi mencari kombinasi komponen dari nol, melainkan mencari strategi operasi optimal dan kebutuhan kapasitas tambahan (jika diperlukan) untuk meminimalkan NPC dan memaksimalkan penetrasi energi terbarukan dengan mempertimbangkan biaya marjinal dari setiap penambahan kapasitas.

Teori ini menjadi dasar untuk mengukur Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid (X2) dan Optimalisasi Model Microgrid (Y1) . Indikator X2 meliputi efisiensi sistem, tingkat penetrasi energi terbarukan (%), keandalan sistem (LOLP), kapasitas penyimpanan energi, dan faktor kapasitas pembangkit. Sementara indikator Y meliputi komposisi energi optimal, biaya sistem terendah hasil optimasi dan keandalan sistem optimal.

2.5.4 Teori Penerimaan Teknologi dan Dampak Sosial-Lingkungan

Selain aspek teknis dan ekonomi, keberhasilan implementasi dan optimalisasi *Microgrid* di daerah terpencil sangat ditentukan oleh Penerimaan Sosial (Social Acceptance) . Penelitian ini mengadopsi kerangka Technology Acceptance Model (TAM) yang dikembangkan oleh Davis (1989) dan diadaptasi untuk konteks energi terbarukan oleh Wüstenhagen *et al*. (2007). Menurut model ini, penerimaan masyarakat terhadap teknologi *Microgrid* dipengaruhi oleh tiga dimensi utama:

1. Persepsi Kebermanfaatan (Perceived Usefulness)

   Sejauh mana masyarakat meyakini bahwa optimalisasi *Microgrid* akan menurunkan biaya listrik, meningkatkan keandalan pasokan (menuju 24 jam), dan mendukung aktivitas ekonomi pariwisata.

2. Persepsi Kemudahan (Perceived Ease of Use):

   Tingkat keyakinan bahwa pengoperasian dan pemeliharaan sistem tidak akan mengganggu aktivitas sosial-ekonomi masyarakat (misal: kebisingan PLTD yang berkurang, estetika panel surya yang tidak mengganggu pemandangan).

3. Dampak Sosial-Ekonomi Lokal

   Potensi penciptaan lapangan kerja baru dalam instalasi, pemeliharaan, dan pengelolaan sistem *Microgrid*, serta potensi penurunan biaya listrik bagi rumah tangga dan pelaku usaha.

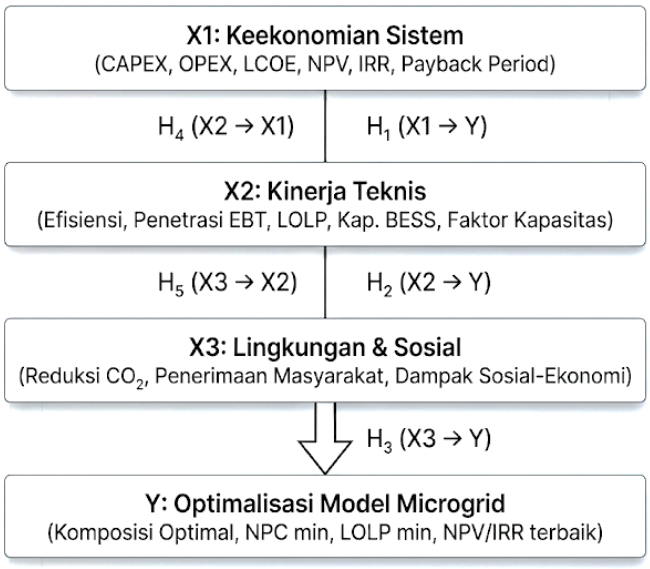
Dalam konteks spesifik Pulau Bunaken yang merupakan kawasan Taman Nasional, dimensi lingkungan memiliki bobot yang sama pentingnya dengan dimensi sosial. Teori Valuasi Jasa Ekosistem (Ecosystem Services Valuation) yang dikembangkan oleh Costanza *et al*. (1997) dan diadaptasi untuk kawasan konservasi laut memberikan landasan untuk mengukur Reduksi Emisi CO_2 sebagai proksi dari manfaat lingkungan. Pengurangan emisi dari sistem PLTD tidak hanya berkontribusi pada mitigasi perubahan

iklim global, tetapi juga secara langsung menjaga kesehatan ekosistem terumbu karang Bunaken yang rentan terhadap pemutihan akibat kenaikan suhu laut dan polusi lokal.

Variabel laten Lingkungan dan Sosial (X3) dalam penelitian ini dibangun berdasarkan adaptasi TAM dan teori valuasi jasa ekosistem, dengan indikator: Reduksi Emisi CO_2, Penerimaan Masyarakat, dan Dampak Sosial-Ekonomi Lokal.

2.5.5 Model Analisis Penelitian

Berdasarkan sintesis landasan teori di atas, disusunlah Model Analisis Penelitian yang menggambarkan hubungan struktural antara variabel laten eksogen (X1, X2, X3) terhadap variabel endogen (Y1), serta hubungan antar variabel eksogen. Model ini merupakan kerangka berpikir utama yang akan diuji secara empiris pada Bab IV.



Gambar 2. 60 Model Analisis Hubungan Antar Variabel Penelitian

Model ini terdiri dari empat konstruk laten dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 2. 3 Definisi Operasional Variabel Laten dan Indikator

Variabel Laten	Kode	Jenis Konstruk	Indikator	Sumber Data
Keekonomian Sistem Microgrid	X1	Formatif	X1.1: Biaya Investasi (CAPEX) X1.2: Biaya Operasi & Pemeliharaan (OPEX) X1.3: *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) X1.4: *Net Present Value* (NPV)	Simulasi HOMER Pro & Analisis Finansial
Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid	X2	Formatif	X2.1: Tingkat Penetrasi EBT (%) X2.2: Keandalan Sistem (LOLP) X2.3: Kapasitas Penyimpanan Energi (kWh)	Simulasi HOMER Pro & Data Operasional
Lingkungan dan Sosial	X3	Formatif	X3.1: Reduksi Emisi CO_2 (ton/tahun) X3.2: Penerimaan Masyarakat (Skala Likert) X3.3: Dampak Sosial-Ekonomi Lokal (Skala Likert)	Simulasi HOMER Pro & Kuesioner
Optimalisasi Model Microgrid	Y1	Formatif	Y.1.1: Komposisi Energi Optimal (Skor) Y.1.2: Biaya Sistem Terendah (NPC) Y.1.3: Keandalan Sistem Optimal (LOLP min)	Simulasi HOMER Pro

Seluruh konstruk dalam penelitian ini ditetapkan sebagai konstruk formatif. Dalam model formatif, arah kausalitas mengalir dari indikator menuju konstruk. Artinya,

perubahan pada indikator (misalnya kenaikan CAPEX) akan menyebabkan perubahan pada nilai konstruk (Keekonomian Sistem Microgrid). Hal ini sesuai dengan realitas empiris, di mana indikator-indikator teknis dan ekonomi yang bersifat objektif dan terukur tidak saling berkorelasi tinggi, melainkan secara bersama-sama membentuk definisi konstruk tersebut (Diamantopoulos & Winklhofer, 2001).

Berdasarkan model struktural di atas, hipotesis yang akan diuji dalam penelitian ini berjumlah lima hipotesis, yang secara eksplisit mewakili kelima rumusan masalah dan tujuan penelitian:

- H_1 (X1 → Y1): Keekonomian Sistem Microgrid (X1) berpengaruh positif dan signifikan terhadap Optimalisasi Model Microgrid (Y1). Dasar Teori: Semakin baik prospek keekonomian suatu konfigurasi (LCOE rendah), semakin optimal model yang dihasilkan.
- H_2 (X2 → Y1): Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid (X2) berpengaruh positif dan signifikan terhadap Optimalisasi Model Microgrid (Y1). Dasar Teori: Keandalan dan efisiensi teknis yang tinggi merupakan prasyarat tercapainya model optimal.
- H_3 (X3 → Y1): Faktor Lingkungan dan Sosial (X3) berpengaruh positif dan signifikan terhadap Optimalisasi Model Microgrid (Y1). Dasar Teori: Penerimaan sosial dan pengurangan emisi menjadi faktor penentu dalam memilih skenario dedieselisasi yang paling berkelanjutan, khususnya di kawasan konservasi.
- H_4 (X2 → X1): Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid (X2) berpengaruh positif dan signifikan terhadap Keekonomian Sistem Microgrid (X1). Dasar Teori: Efisiensi sistem yang tinggi dan keandalan yang baik akan menekan biaya operasional (OPEX) dan konsumsi BBM, sehingga meningkatkan NPV dan menurunkan LCOE. Landasan teoretis mengacu pada Total Quality Management dan Cost of Quality (Juran & Godfrey, 1999).
- H_5 (X3 → X2): Lingkungan dan Sosial (X3) berpengaruh positif dan signifikan terhadap Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid (X2). Dasar Teori: Tuntutan lingkungan (reduksi emisi) dan penerimaan masyarakat mendorong adopsi dan

optimalisasi teknologi energi terbarukan yang lebih andal dan efisien. Landasan teoretis mengacu pada Technology Acceptance Model (Davis, 1989) dan Green Technology Adoption (Wüstenhagen et al., 2007).

Tabel 2. 4 Pemetaan Hipotesis terhadap Rumusan Masalah dan Tujuan

Rumusan Masalah / Tujuan	Diuji Melalui	Keterangan
RM 1 / Tujuan 1: Kondisi eksisting sistem hybrid	Analisis deskriptif (Bab IV) + H_4 (X2→X1)	Kondisi teknis eksisting memengaruhi keekonomian; dijawab secara deskriptif dan diuji pengaruhnya melalui jalur H_4.
RM 2 / Tujuan 2: Potensi energi terbarukan	Analisis deskriptif (Bab IV) + H_5 (X3→X2)	Potensi EBT dan tuntutan lingkungan mendorong peningkatan dasain dan kinerja teknis; dijawab secara deskriptif dan diuji pengaruhnya melalui jalur H_5.
RM 3 / Tujuan 3: Analisis keekonomian perbandingan	H_1 (X1→Y1)	Diuji secara statistik dalam PLS-SEM.
RM 4 / Tujuan 4: Desain pemodelan optimasi	H_2 (X2→Y1)	Diuji secara statistik dalam PLS-SEM.
RM 5 / Tujuan 5: Pengaruh lingkungan & sosial	H_3 (X3→Y1)	Diuji secara statistik dalam PLS-SEM.

2.5.6 Operasionalisasi Model Analisis: Integrasi HOMER Pro dan PLS-SEM

Model analisis ini akan dioperasionalisasikan melalui dua pendekatan yang saling melengkapi dalam desain *mixed-method* sekuensial:

1. Analisis Kuantitatif Simulatif (Fase I)

   Menggunakan perangkat lunak HOMER Pro untuk menghasilkan data numerik pada indikator-indikator X1, X2, dan Y berdasarkan berbagai skenario optimasi. Skenario yang dieksplorasi meliputi:

- ❖ Skenario-0 (Baseline): Sistem hybrid eksisting (PLTD + PLTS 286,7 kWp + BESS 540 kWh).
- ❖ Skenario-1: Optimalisasi strategi *dispatch* eksisting tanpa penambahan kapasitas.
- ❖ Skenario-2: Penambahan kapasitas PLTS dan/atau BESS untuk meningkatkan penetrasi EBT.
- ❖ Skenario-3: Dedieselisasi penuh (100% EBT, PLTD dinonaktifkan). Setiap skenario akan dievaluasi berdasarkan NPC, LCOE, LOLP, dan emisi CO_2.

2. Analisis Jalur (Path Analysis) (Fase II)

   Menggunakan perangkat lunak SmartPLS 4.0 untuk menguji signifikansi dan kekuatan hubungan kausal pada model struktural. Data kuantitatif dari Fase I akan digabungkan dengan data kuesioner (X3) untuk diolah dalam model PLS-SEM. Pendekatan ini dipilih karena kemampuannya menangani model dengan konstruk formatif, ukuran sampel yang relatif kecil, serta tidak mensyaratkan asumsi distribusi normal yang ketat (Hair *et al*., 2021). Kebaruan metodologis terletak pada pengujian jalur H_4 dan H_5 yang selama ini belum dieksplorasi dalam studi microgrid kepulauan, di mana hubungan antara dasain dan kinerja teknis terhadap keekonomian serta pengaruh lingkungan-sosial terhadap dasain dan kinerja teknis diuji secara statistik.

Kerangka teori dan model analisis ini menjadi fondasi metodologis yang membedakan penelitian ini dari studi-studi terdahulu. Dengan mengintegrasikan optimasi teknis-ekonomi berbasis data riil sistem *brownfield* dan analisis jalur untuk variabel sosial-lingkungan, penelitian ini menawarkan pendekatan holistik yang belum pernah diterapkan dalam konteks dedieselisasi pulau wisata konservasi di Indonesia.

2.6 *Path Analysis* dengan Pendekatan PLS-SEM

2.6.1 Konsep Dasar Analisis Jalur dan *Structural Equation Modeling* (SEM)

Analisis jalur (*path analysis*) merupakan teknik statistik multivariat yang digunakan untuk menguji hubungan kausal antar variabel dalam suatu model struktural yang telah dibangun berdasarkan landasan teori yang kuat. Teknik ini merupakan perluasan dari analisis regresi berganda yang memungkinkan peneliti untuk menguji serangkaian hubungan dependensi secara simultan, termasuk pengaruh langsung (*direct effect*), pengaruh tidak langsung (*indirect effect*), dan pengaruh total (*total effect*) antar variabel laten (Hair *et al*., 2021).

Dalam konteks penelitian ini, model hubungan antara Keekonomian Sistem Microgrid (X1) , Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid (X2) , dan Lingkungan dan Sosial (X3) terhadap Optimalisasi Model Microgrid (Y1) bersifat kompleks dan melibatkan konstruk yang tidak dapat diukur secara langsung (*unobserved variables*). Setiap konstruk diukur melalui beberapa indikator formatif yang secara bersama-sama membentuk makna konstruk tersebut. Oleh karena itu, pendekatan Structural Equation Modeling (SEM) dipilih sebagai kerangka analisis yang paling sesuai.

2.6.2 Justifikasi Pemilihan *Partial Least Squares* SEM (PLS-SEM)

Dalam literatur metodologi penelitian, terdapat dua pendekatan utama dalam SEM, yaitu *Covariance-Based* SEM (CB-SEM) dan Variance-Based SEM (PLS-SEM) . Penelitian ini secara spesifik memilih pendekatan Partial Least Squares – Structural Equation Modeling (PLS-SEM) dengan menggunakan perangkat lunak SmartPLS 4.0.

Penggunaan metode *Structural Equation Modeling* (SEM) berbasis komponen telah banyak diadopsi dalam penelitian manajemen energi di Indonesia untuk menjelaskan hubungan kompleks antar variabel laten yang bersifat prediktif. Beberapa studi terdahulu telah berhasil menggunakan pendekatan ini, seperti penggunaan *Generalized Structured Component Analysis* (GeSCA) untuk memprediksi pengaruh konsumsi energi terhadap pertumbuhan ekonomi (Adi *et al*., 2022) maupun untuk menganalisis dampak variabilitas harga komoditas energi terhadap risiko bisnis perusahaan (Adi, 2022). Selain itu, efektivitas metode ini dalam menangani model dengan

indikator formatif dan sampel terbatas telah dibuktikan dalam penelitian mengenai pengaruh tata kelola terhadap kinerja keuangan perusahaan tambang di Indonesia (Adi et al., 2013). Hal ini memberikan dasar metodologis yang kuat bagi penggunaan PLS-SEM dalam penelitian ini sebagai alat analisis yang andal untuk menguji hubungan struktural antara konstruk keekonomian, dasain dan kinerja teknis, serta aspek lingkungan-sosial dalam pengambilan keputusan optimalisasi *microgrid.*

Pemilihan ini didasarkan pada beberapa pertimbangan metodologis yang selaras dengan karakteristik data dan tujuan penelitian:

1. Tujuan Penelitian yang Bersifat Prediktif dan Eksploratif

   Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji suatu model teoretis baru yang mengintegrasikan variabel teknis-ekonomi dengan variabel sosial-lingkungan dalam konteks optimalisasi sistem *brownfield Microgrid*. PLS-SEM sangat cocok untuk penelitian yang bertujuan memprediksi konstruk target dan mengembangkan teori (*prediction-oriented and theory development*), bukan sekadar mengkonfirmasi teori yang sudah mapan secara ketat (Hair *et al*., 2019). Dalam hal ini, belum ada penelitian sebelumnya yang secara simultan menguji pengaruh X1, X2, dan X3 terhadap Y pada kasus dedieselisasi di kawasan konservasi laut.

2. Kompleksitas Model Struktural

   Model yang diajukan melibatkan empat konstruk laten dengan total 17 indikator formatif. PLS-SEM memiliki kapasitas yang unggul dalam menangani model dengan kompleksitas tinggi dan jumlah jalur yang banyak tanpa mensyaratkan ukuran sampel yang sangat besar sebagaimana dipersyaratkan oleh CB-SEM. Aturan praktis (*rule of thumb*) untuk PLS-SEM adalah ukuran sampel minimal 10 kali jumlah maksimum jalur struktural yang mengarah ke suatu konstruk endogen (Hair *et al*., 2021). Dengan tiga jalur menuju Y, sampel minimal adalah 30, yang dapat dipenuhi dalam penelitian ini.

3. Sifat Data yang Tidak Mensyaratkan Asumsi Distribusi Normal

Data yang dihasilkan dari simulasi HOMER Pro (untuk indikator X1, X2, dan Y) bersifat deterministik dan mungkin tidak mengikuti distribusi normal multivariat. Demikian pula data persepsi dari kuesioner (untuk X3) yang menggunakan skala Likert seringkali tidak memenuhi asumsi normalitas. PLS-SEM merupakan metode non-parametrik yang tidak bergantung pada asumsi distribusi normal, melainkan menggunakan prosedur *bootstrapping* untuk menghasilkan *standard error* dan nilai signifikansi (Hair *et al*., 2021).

4. Fleksibilitas Model Pengukuran Formatif

   Sebagaimana dijelaskan pada Sub-bab 2.5.5, seluruh konstruk dalam penelitian ini bersifat formatif. Dalam model pengukuran formatif, indikator-indikator tidak diharapkan berkorelasi tinggi satu sama lain, melainkan secara bersama-sama membentuk konstruk. PLS-SEM memiliki kapasitas alami untuk menangani model dengan konstruk formatif, sementara CB-SEM seringkali menghadapi masalah identifikasi ketika menangani konstruk formatif murni (Diamantopoulos & Winklhofer, 2001).

2.6.3 Spesifikasi Model dalam Analisis Jalur

Sesuai dengan kerangka teori yang telah diuraikan pada Sub-bab 2.5.5, model analisis jalur dalam penelitian ini terdiri dari dua komponen utama: Model Pengukuran (Outer Model) dan Model Struktural (Inner Model) .

2.6.3.1. Model Pengukuran (Outer Model)

Model pengukuran mendefinisikan hubungan antara variabel laten dengan indikator-indikatornya. Karena seluruh konstruk bersifat formatif, maka hubungan kausalitas mengalir dari indikator menuju konstruk. Tabel 2.5 merangkum spesifikasi konstruk dan indikator yang digunakan.

Tabel 2. 5 Spesifikasi Model Pengukuran Formatif (Outer Model)

Variabel Laten	Kode	Jenis Konstruk	Indikator	Sumber Data	Ekspektasi Tanda
Keekonomian Sistem Microgrid	X1	Formatif	X1.1: CAPEX ($) X1.2: OPEX ($/yr) X1.3: LCOE ($/kWh) X1.4: NPV ($)	HOMER Pro & Analisis Finansial	X1.1, X1.2, X1.3, X1.4
Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid	X2	Formatif	X2.1: Penetrasi EBT (%) X2.2: Keandalan (LOLP) X2.3: Kapasitas BESS (kWh)	HOMER Pro & Data Operasional	X2.1, X2.2, X2.3 (+)
Lingkungan dan Sosial	X3	Formatif	X3.1: Reduksi Emisi CO_2 (ton/tahun) X3.2: Penerimaan Masyarakat (1-5) X3.3: Dampak Sosial-Ekonomi (1-5)	HOMER Pro & Kuesioner	Semua (+)
Optimalisasi Model *Microgrid*	Y	Formatif	Y.1: Komposisi Energi Optimal (Skor) Y.2: Biaya Sistem Terendah (NPC) Y.3: Keandalan Optimal (LOLP min)	HOMER Pro	Y.1, Y.4 (+) Y.2, Y.3 (-)

Tanda (-) menunjukkan indikator berkontribusi negatif terhadap konstruk (misal: semakin kecil LCOE, semakin baik Keekonomian Sistem Microgrid). Dalam analisis

PLS-SEM, data untuk indikator dengan ekspektasi tanda negatif akan dikalikan dengan -1 (reverse coding) agar interpretasi koefisien jalur konsisten.

2.6.3.2 Model Struktural (Inner Model)

Model struktural menggambarkan hubungan kausal antar variabel laten berdasarkan hipotesis yang telah dirumuskan. Secara matematis, persamaan struktural untuk model ini dapat dituliskan sebagai:

Persamaan 1 (Y1 sebagai variabel endogen):

$$Y1 = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \zeta_Y \quad (2.13)$$

Persamaan 2 (X1 sebagai variabel endogen antara):

$$X_1 = \beta_4 X_2 + \zeta_{X1} \quad (2.14)$$

Persamaan 3 (X2 sebagai variabel endogen antara):

$$X_2 = \beta_5 X_3 + \zeta_{X2} \quad (2.15)$$

di mana:

- Y_1 = Variabel Endogen Final (Optimalisasi Model Microgrid)
- X_1 = Variabel Endogen Antara / Eksogen (Keekonomian Sistem Microgrid)
- X_2 = Variabel Endogen Antara / Eksogen (Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid)
- X_3 = Variabel Eksogen Murni (Lingkungan dan Sosial)
- $\beta_{1,2,3}$ = Koefisien Jalur pengaruh langsung ke Y
- β_4 = Koefisien Jalur X2 → X1
- β_5 = Koefisien Jalur X3 → X2
- ζ = Residual Error untuk masing-masing persamaan

Hipotesis statistik yang diuji dalam model struktural ini adalah:

H_1: Keekonomian Sistem Microgrid (X1) memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap Optimalisasi Model Microgrid (Y1).

- H_0: $\beta_1 = 0$ (Tidak ada pengaruh)
- H_a: $\beta_1 > 0$ (Ada pengaruh positif)

H_2: Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid (X2) memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap Optimalisasi Model Microgrid (Y1).

- H_0: $\beta_2 = 0$ (Tidak ada pengaruh)
- H_a: $\beta_2 > 0$ (Ada pengaruh positif)

H_3: Lingkungan dan Sosial (X3) memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap Optimalisasi Model Microgrid (Y1).

- H_0: $\beta_3 = 0$ (Tidak ada pengaruh)
- H_a: $\beta_3 > 0$ (Ada pengaruh positif)

H_4: Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid (X2) memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap Keekonomian Sistem Microgrid (X1).

- H_0: $\beta_4 = 0$ (Tidak ada pengaruh)
- H_a: $\beta_4 > 0$ (Ada pengaruh positif)
- Justifikasi: Efisiensi sistem yang tinggi dan keandalan yang baik akan menekan biaya operasional (OPEX) dan konsumsi BBM, sehingga meningkatkan NPV dan menurunkan LCOE.

H_5: Lingkungan dan Sosial (X3) memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap Desain dan Kinerja Teknis Sistem Microgrid (X2).

- H_0: $\beta_5 = 0$ (Tidak ada pengaruh)

- H_a: $\beta_5 > 0$ (Ada pengaruh positif)
- Justifikasi: Tuntutan lingkungan (reduksi emisi) dan penerimaan masyarakat mendorong adopsi dan optimalisasi teknologi energi terbarukan yang lebih andal dan efisien, khususnya di kawasan konservasi Taman Nasional Bunaken.

Kriteria penerimaan H_a: p-value < 0,05 dan t-statistik > 1,645 (uji satu arah, $\alpha = 0,05$). Seluruh pengujian menggunakan prosedur *bootstrapping* dengan 5.000 sub-sampel pada SmartPLS 4.0.

2.6.4 Prosedur dan Kriteria Evaluasi Model PLS-SEM

Evaluasi model PLS-SEM dilakukan secara bertahap dan sistematis sesuai dengan panduan yang ditetapkan oleh Hair *et al*. (2021) untuk model dengan konstruk formatif.

2.6.4.1 Evaluasi Model Pengukuran Formatif

Untuk model dengan konstruk formatif, konsep validitas dan reliabilitas tidak diukur menggunakan *Cronbach's Alpha* atau *Composite Reliability* sebagaimana model reflektif. Evaluasi konstruk formatif meliputi dua pengujian utama:

1. Uji Multikolinearitas Antar Indikator

   Indikator formatif secara konseptual tidak saling berkorelasi tinggi. Keberadaan multikolinearitas yang kuat antar indikator dapat mengganggu estimasi bobot indikator (*outer weight*) dan menyebabkan interpretasi yang keliru. Evaluasi dilakukan dengan menghitung nilai Variance Inflation Factor (VIF) untuk setiap indikator. Nilai VIF harus < 5,0. Jika terdapat indikator dengan VIF ≥ 5,0, maka indikator tersebut menunjukkan tumpang tindih konseptual yang tinggi dengan indikator lain dan harus dipertimbangkan untuk dieliminasi atau digabungkan (Hair *et al*., 2021).

2. Signifikansi Bobot Indikator (Outer Weight)

Analisis *bootstrapping* dengan 5.000 sub-sampel dilakukan untuk menguji signifikansi kontribusi relatif masing-masing indikator terhadap konstruknya. Indikator dengan nilai p-value < 0,05 atau t-statistik > 1,96 (uji dua arah) dinyatakan valid sebagai pembentuk konstruk. Namun, jika suatu indikator tidak signifikan secara statistik tetapi memiliki nilai *loading* (*outer loading*) yang tinggi (> 0,50), maka indikator tersebut dapat dipertahankan berdasarkan pertimbangan kontribusi absolutnya terhadap konstruk (Hair *et al*., 2021). Dalam konteks penelitian ini, seluruh indikator diharapkan memiliki kontribusi yang signifikan karena dipilih berdasarkan justifikasi teoretis dan empiris yang kuat.

2.6.4.2 Evaluasi Model Struktural

Evaluasi model struktural bertujuan untuk menilai kekuatan prediksi model dan menguji hipotesis yang diajukan. Mengingat model struktural dalam penelitian ini terdiri dari tiga persamaan simultan (Y1, X1, dan X2 sebagai variabel endogen), kriteria evaluasi meliputi:

1. Koefisien Determinasi (R^2)

Nilai R^2 menunjukkan proporsi varians variabel endogen yang mampu dijelaskan oleh variabel eksogen yang memengaruhinya. Dalam model ini, R^2 dihitung untuk tiga variabel endogen:

- R^2 untuk Y: Proporsi varians Optimalisasi Model Microgrid (Y1) yang dijelaskan secara bersama-sama oleh Keekonomian Sistem Microgrid (X1), Dasain dan Kinerja Teknis (X2), dan Lingkungan & Sosial (X3).
- R^2 untuk X1: Proporsi varians Keekonomian Sistem Microgrid (X1) yang dijelaskan oleh Desain dan Kinerja Teknis (X2), relevan untuk menguji H_4.
- R^2 untuk X2: Proporsi varians Desain dan Kinerja Teknis (X2) yang dijelaskan oleh Lingkungan & Sosial (X3), relevan untuk menguji H_5.

Kriteria interpretasi nilai R^2 menurut Chin (1998) dalam konteks penelitian sosial adalah:

- $R^2 \approx 0{,}67$: Kuat (*Substantial*)
- $R^2 \approx 0{,}33$: Moderat (*Moderate*)
- $R^2 \approx 0{,}19$: Lemah (*Weak*)

Nilai R^2 menjadi indikator utama kekuatan prediktif model secara keseluruhan. Mengingat penelitian ini bersifat eksploratif dengan integrasi variabel baru (X3) dan pengujian jalur antar eksogen (H_4 dan H_5) yang belum pernah diuji sebelumnya dalam studi microgrid kepulauan, nilai R^2 yang moderat ($\geq 0{,}33$) untuk Y sudah dapat dianggap memuaskan.

3. Ukuran Efek (f^2)

Nilai f^2 mengukur kontribusi unik masing-masing variabel eksogen terhadap variabel endogen, dihitung sebagai perubahan nilai R^2 ketika suatu variabel eksogen dihilangkan dari model. Dalam model ini, f^2 dihitung untuk kelima jalur:

- f^2 untuk H_1 (X1 → Y1)
- f^2 untuk H_2 (X2 → Y1)
- f^2 untuk H_3 (X3 → Y1)
- f^2 untuk H_4 (X2 → X1)
- f^2 untuk H_5 (X3 → X2)

Kriteria Cohen (1988) untuk interpretasi f^2 adalah:

- $f^2 \approx 0{,}02$: Pengaruh Kecil
- $f^2 \approx 0{,}15$: Pengaruh Sedang
- $f^2 \approx 0{,}35$: Pengaruh Besar

4. Koefisien Jalur (*Path Coefficient*) dan Uji Signifikansi

Koefisien jalur (β) menunjukkan arah dan kekuatan hubungan langsung antar variabel laten. Nilai koefisien jalur berkisar antara -1 hingga +1. Dalam model ini, terdapat lima koefisien jalur yang diuji:

- β_1 (X1 → Y1), β_2 (X2 → Y1), β_3 (X3 → Y1), β_4 (X2 → X1), dan β_5 (X3 → X2).

Pengujian signifikansi dilakukan melalui prosedur *bootstrapping* dengan 5.000 sub-sampel. Hipotesis alternatif (H_1, H_2, H_3, H_4, H_5) diterima jika:

- p-value < 0,05 (untuk uji satu arah), dan
- t-statistik > 1,645 (untuk uji satu arah pada $\alpha = 0,05$), dan
- Tanda koefisien jalur positif sesuai ekspektasi teoretis.

2.6.5 Integrasi Data Simulasi HOMER Pro dan Data Kuesioner dalam PLS-SEM

Suatu aspek yang membedakan penelitian ini dari studi SEM konvensional adalah sumber data yang digunakan. Tidak seperti penelitian sosial murni yang mengandalkan data survei primer secara eksklusif, penelitian ini mengintegrasikan dua jenis data:

1. Data Kuantitatif Hasil Simulasi HOMER Pro

   Data ini merupakan output dari berbagai skenario optimasi yang dijalankan pada Fase I penelitian. Data ini bersifat objektif, numerik, dan deterministik. Setiap skenario menghasilkan satu set nilai untuk indikator X1, X2, dan Y. Untuk keperluan analisis jalur, setiap skenario diperlakukan sebagai satu kasus (case/observation) dalam *dataset* PLS-SEM. Dengan mengeksplorasi berbagai kombinasi parameter (misal: variasi kapasitas PLTS, strategi *dispatch*, harga BBM), dapat dihasilkan sejumlah kasus yang cukup untuk memenuhi persyaratan ukuran sampel minimal PLS-SEM.

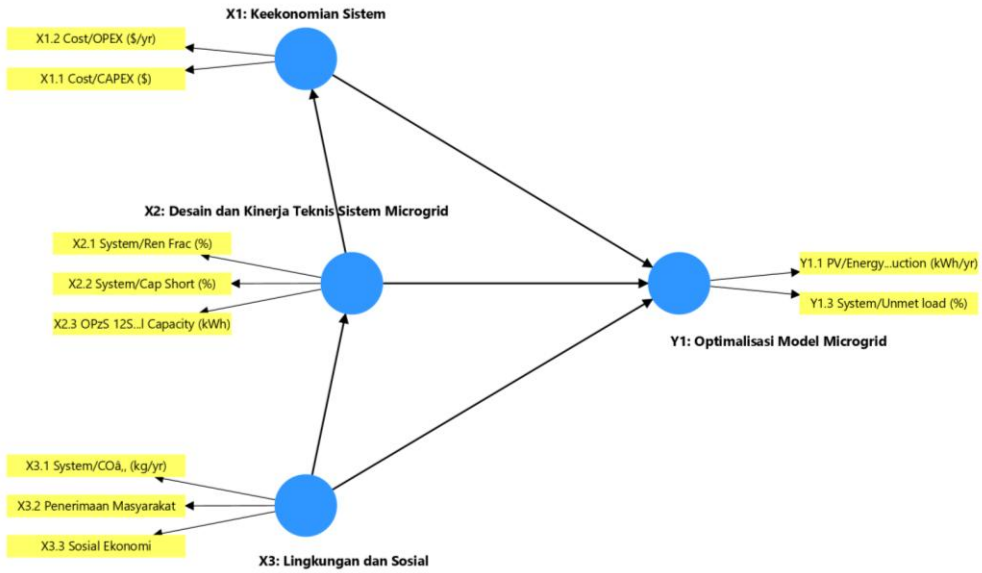
2. Data Kuesioner Persepsi Pemangku Kepentingan

   Data ini dikumpulkan melalui kuesioner terstruktur yang disebarkan kepada responden kunci di Pulau Bunaken (perwakilan PLN, pemerintah daerah, pengelola resor, tokoh masyarakat, dan perwakilan Balai Taman Nasional). Instrumen kuesioner menggunakan skala Likert 5 poin untuk mengukur indikator X3.1 (persepsi terhadap reduksi emisi), X3.2 (penerimaan masyarakat), dan X3.3 (dampak sosial-ekonomi). Data ini bersifat subjektif dan perseptual.

Karena data HOMER Pro dihasilkan per skenario, sedangkan data kuesioner merepresentasikan persepsi umum masyarakat Bunaken (bukan per skenario), integrasi data dilakukan dengan pendekatan rata-rata terbobot atau skor komposit untuk variabel X3 pada setiap skenario. Alternatif lain, analisis jalur dapat dilakukan secara terpisah untuk komponen teknis-ekonomi dan sosial-lingkungan, kemudian hasilnya diintegrasikan dalam diskusi kualitatif.

2.6.6. Diagram Jalur (*Path Diagram*) Penelitian

Untuk memberikan visualisasi yang jelas mengenai hubungan antar variabel, berikut disajikan diagram jalur penelitian. Diagram ini akan diolah menggunakan perangkat lunak SmartPLS 4.0.



Gambar 2. 61 Diagram Jalur Model Penelitian

Keterangan:

- Panah dari indikator ke konstruk: Hubungan formatif (*outer model*)
- Panah solid horizontal (H_4, H_5): Hubungan struktural antar variabel eksogen (*inner model*)
- Panah solid vertikal (H_1, H_2, H_3): Hubungan struktural menuju variabel endogen (*inner model*)