

ANALISIS KELAYAKAN DAN PERFORMA SISTEM HIBRIDA PLTS- PLTB-PLTSA TERINTEGRASI GRID UNTUK KEBUTUHAN ENERGI KAMPUS BERBASIS *HOMER PRO*

Moch. Hikmah Risky Kurniawan¹, Priyo Adi Sesotyo², Fahrudin Ahmad³
Universitas Semarang^{1,2,3}
psesotyo@usm.ac.id¹

Abstract: *The increasing demand for electrical energy in university campuses requires the development of energy systems that are reliable, economically feasible, and environmentally sustainable. This study aims to evaluate the technical performance, economic feasibility, and environmental impact of a hybrid energy system integrating Solar Photovoltaic (PV), Wind Turbine (WT), and Waste-to-Energy (WTE) power generation connected to the utility grid. The research methodology involved collecting renewable energy resource data, electrical load profiles, and techno-economic parameters, which were subsequently analyzed using HOMER Pro software to determine the optimal system configuration. The simulation results indicate that the proposed system is capable of generating 972,876 kWh/year of electricity, with renewable energy contributing 717,784 kWh/year or approximately 73.8% of the total annual energy production. The system achieved a renewable fraction of 75.2%, a Net Present Cost (NPC) of IDR 13.85 billion, and a Cost of energy (COE) of IDR 1,122/kWh. Furthermore, the electricity exported to the grid reached 315,694 kWh/year, exceeding the imported electricity of 255,092 kWh/year, indicating that the system operates as a net exporter. From an environmental perspective, the WTE unit utilizes 88.7 tons of municipal solid waste annually while supporting emission reduction and renewable energy utilization. Overall, the results demonstrate that the proposed hybrid system is technically reliable, economically viable, and environmentally beneficial, making it a promising solution for supporting green campus development and sustainable energy implementation.*

Keywords: *HOMER Pro; Hybrid System; PLTS; PLTSa; Renewable Energy.*

Abstrak: Peningkatan kebutuhan energi listrik pada lingkungan kampus mendorong perlunya pengembangan sistem energi yang andal, ekonomis, dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja teknis, kelayakan ekonomi, dan dampak lingkungan dari sistem hibrida yang mengintegrasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), dan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) yang terhubung dengan jaringan listrik. Metode penelitian dilakukan melalui pengumpulan data potensi energi terbarukan, kebutuhan beban listrik, serta parameter teknis dan ekonomi yang kemudian disimulasikan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro untuk memperoleh konfigurasi sistem yang optimal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan energi listrik sebesar 972.876 kWh/tahun dengan kontribusi energi terbarukan sebesar 717.784 kWh/tahun atau sekitar 73,8% dari total produksi energi. Sistem memiliki *renewable fraction* sebesar 75,2%, nilai *Net Present Cost* (NPC) sebesar Rp13,85 miliar, dan *Cost of energy* (COE) sebesar Rp1.122/kWh. Selain itu, energi yang dijual ke jaringan listrik sebesar 315.694 kWh/tahun lebih besar dibandingkan energi yang dibeli sebesar 255.092 kWh/tahun, sehingga sistem beroperasi sebagai *net exporter*. Dari aspek lingkungan, sistem mampu memanfaatkan sampah sebesar 88,7 ton/tahun melalui PLTSa serta mendukung pengurangan emisi dan peningkatan pemanfaatan energi terbarukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem hibrida PLTS–PLTB–PLTSa layak diterapkan untuk mendukung konsep *green campus* dan pengembangan energi berkelanjutan.

Kata kunci: Energi Terbarukan; HOMER Pro; PLTS; PLTSa; Sistem Hibrida.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus mengalami peningkatan seiring dengan perkembangan teknologi, pertumbuhan aktivitas ekonomi, serta meningkatnya penggunaan peralatan elektronik pada berbagai sektor. Sektor pendidikan merupakan salah satu sektor yang memiliki kebutuhan energi listrik yang cukup tinggi karena operasional gedung perkuliahan, laboratorium, pusat data, sistem pendingin ruangan, serta berbagai fasilitas pendukung lainnya memerlukan pasokan listrik yang andal dan berkelanjutan. (Sujito et al., 2022) menjelaskan bahwa peningkatan aktivitas akademik dan operasional fasilitas pendidikan berkontribusi terhadap meningkatnya konsumsi energi listrik pada lingkungan kampus. Selain itu, (Jamaludin & Saepuloh, 2024) menyatakan bahwa implementasi teknologi digital dan konsep *smart campus* turut meningkatkan kebutuhan energi listrik pada institusi pendidikan modern.

Ketergantungan yang tinggi terhadap energi listrik konvensional menyebabkan meningkatnya biaya operasional sekaligus memperbesar dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh penggunaan energi berbasis bahan bakar fosil. Oleh karena itu, pemanfaatan energi terbarukan menjadi salah satu alternatif yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan terhadap jaringan listrik konvensional. (Nurcahya et al., 2025) menunjukkan bahwa penerapan sistem energi terbarukan hibrida mampu menurunkan biaya operasional dibandingkan penggunaan sumber energi konvensional secara penuh. Hasil penelitian (Bonifacius, 2018) juga menunjukkan bahwa sistem pembangkit listrik tenaga surya memiliki biaya operasional yang lebih ekonomis

dibandingkan pembangkit berbasis bahan bakar fosil dalam jangka panjang.

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, penggunaan sumber energi terbarukan secara tunggal masih menghadapi sejumlah keterbatasan. (Noor & Rahman, 2023) menjelaskan bahwa sumber energi terbarukan memiliki karakteristik yang dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan faktor musiman sehingga menghasilkan fluktuasi daya yang sulit diprediksi. (Harianto & Karjadi, 2025) menyatakan bahwa sistem tenaga surya masih menghadapi kendala berupa tingginya biaya investasi awal serta keterbatasan teknologi penyimpanan energi. (Sepdian, 2020) melaporkan bahwa sistem energi berbasis surya dan angin dapat menghasilkan keluaran tegangan yang tidak stabil akibat variasi sumber daya alam yang digunakan. Selain itu (Mauliza et al., 2023) menjelaskan bahwa pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi sering menghadapi kendala ketersediaan bahan baku yang bersaing dengan kebutuhan sektor lainnya. (Manahara & Putri, 2023) menambahkan bahwa keterbatasan infrastruktur dan teknologi menjadi salah satu hambatan utama dalam implementasi energi terbarukan secara luas.

Untuk mengatasi berbagai keterbatasan tersebut, sistem pembangkit listrik hibrida menjadi salah satu solusi yang banyak dikembangkan karena mampu mengombinasikan beberapa sumber energi dalam satu sistem terintegrasi. (Putri & Koenhardono, 2016) menunjukkan bahwa penerapan sistem hibrida mampu menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 15,5% dibandingkan sistem konvensional. (Adipradana et al., 2025) melaporkan bahwa sistem hibrida dapat mengurangi waktu operasi generator konvensional hingga 1,5 jam per hari

sehingga meningkatkan efisiensi operasional sistem. Integrasi beberapa sumber energi terbarukan memungkinkan karakteristik masing-masing sumber energi saling melengkapi sehingga kontinuitas pasokan energi dapat dipertahankan dengan lebih baik.

Selain sumber pembangkit, sistem hibrida memerlukan perangkat konverter (converter) sebagai komponen antarmuka yang menghubungkan sumber energi arus searah (DC) dan arus bolak-balik (AC) dalam satu sistem terintegrasi. Pada sistem yang memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), converter berfungsi mengubah energi listrik DC yang dihasilkan panel surya menjadi energi listrik AC sehingga dapat digunakan untuk melayani beban listrik maupun diintegrasikan dengan jaringan listrik PLN. Keberadaan converter juga berperan penting dalam mengatur aliran daya antar komponen sistem sehingga operasi pembangkit, beban, dan jaringan listrik dapat berjalan secara optimal. Oleh karena itu, pemilihan kapasitas dan efisiensi converter menjadi salah satu faktor yang memengaruhi kinerja teknis dan ekonomi sistem energi hibrida secara keseluruhan (Riayatsyah et al., 2022).

Selain memberikan keuntungan teknis, sistem pembangkit listrik hibrida juga menawarkan manfaat ekonomi yang signifikan. (Alvianingsih & Simanjuntak, 2021) melaporkan bahwa sistem pembangkit listrik hibrida menghasilkan nilai *Net Present Cost* (NPC) dan *Levelized Cost of energy* (COE) yang lebih rendah dibandingkan sistem pembangkit konvensional. (Otong et al., 2017) menunjukkan bahwa peningkatan kontribusi energi terbarukan dalam sistem hibrida dapat dicapai tanpa mengurangi kelayakan ekonomi sistem secara keseluruhan.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengembangan sistem hibrida tidak hanya mampu meningkatkan keandalan pasokan energi tetapi juga memberikan keuntungan dari aspek investasi dan biaya operasional.

Di samping manfaat ekonomi, pengembangan sistem energi terbarukan juga berkontribusi terhadap upaya pengurangan emisi gas rumah kaca dan pencapaian target pembangunan berkelanjutan. (Komara & Mahardika, 2026) menunjukkan bahwa pemanfaatan energi terbarukan mampu menurunkan emisi karbon secara signifikan dibandingkan sistem yang sepenuhnya bergantung pada energi fosil. (Triani et al., 2024) menjelaskan bahwa peningkatan pemanfaatan energi terbarukan merupakan salah satu strategi penting dalam mendukung pencapaian target bauran energi nasional dan transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa HOMER Pro/HOMER Grid efektif digunakan untuk menganalisis kelayakan teknis, ekonomi, dan lingkungan sistem energi hibrida terintegrasi jaringan pada lingkungan kampus. Riayatsyah et al. (2022) pada Universitas Syiah Kuala menemukan bahwa kombinasi PLTS–PLTB yang terhubung grid mampu menyumbang sekitar 82% kebutuhan listrik, dengan *cost of energy* turun dari US\$0,060/kWh menjadi US\$0,0446/kWh. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Ajiboye et al. (2022) juga menunjukkan melalui 32 skenario HOMER pada Covenant University bahwa optimasi sistem hibrida perlu mempertimbangkan indikator teknis, ekonomi, lingkungan, serta sensitivitas harga energi. Sementara itu, Al-Najjar et al. (2022) menegaskan bahwa integrasi pembangkit berbasis limbah/biogas

dengan PLTS dan grid dapat dievaluasi menggunakan HOMER Pro berdasarkan efisiensi energi, ukuran sistem, biaya, dan indikator kinerja lainnya.

Dengan demikian, penelitian mengenai analisis kelayakan dan performa PLTS–PLTB–PLTSa terintegrasi grid untuk kebutuhan energi kampus memiliki dasar ilmiah yang kuat, sekaligus menawarkan pengembangan dari penelitian sebelumnya karena menggabungkan tiga sumber energi terbarukan—surya, angin, dan sampah—dalam satu konfigurasi kampus berbasis HOMER Pro

Meskipun berbagai penelitian mengenai sistem pembangkit listrik hibrida telah banyak dilakukan seperti dipaparkan pada hasil penelitian diatas, sebagian besar penelitian masih berfokus pada kombinasi dua sumber energi, seperti PLTS–PLTB atau PLTS–diesel. Kajian yang mengintegrasikan tiga sumber energi terbarukan sekaligus, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), dan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa), khususnya pada sistem yang terhubung dengan jaringan listrik, masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi sistem pembangkit listrik hibrida PLTS–PLTB–PLTSa yang terintegrasi dengan jaringan listrik menggunakan perangkat lunak HOMER Pro berdasarkan parameter produksi energi, kontribusi energi terbarukan, *Net Present Cost* (NPC), *Cost of energy* (COE), serta potensi pengurangan emisi karbon.

LANDASAN TEORI

Sistem Pembangkit Listrik Hibrida

Sistem pembangkit listrik hibrida merupakan sistem yang

menggabungkan dua atau lebih sumber energi untuk meningkatkan keandalan, efisiensi, dan pemanfaatan energi terbarukan. Pada penelitian ini, sistem hibrida terdiri atas PLTS, PLTB, dan PLTSa yang terintegrasi dengan jaringan listrik (grid).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS mengubah energi matahari menjadi energi listrik menggunakan modul fotovoltaik. Produksi energi PLTS dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari dan kondisi cuaca sehingga umumnya dikombinasikan dengan sumber energi lain dalam sistem hibrida.

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

PLTB memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik melalui turbin angin. Dalam sistem hibrida, PLTB berfungsi sebagai sumber energi pelengkap untuk meningkatkan keandalan pasokan listrik.

Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)

PLTSa memanfaatkan sampah sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik. Selain menghasilkan listrik, PLTSa juga membantu mengurangi volume sampah sehingga memberikan manfaat energi dan lingkungan.

HOMER Pro

HOMER Pro adalah perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi dan optimasi sistem energi hibrida. Perangkat lunak ini mengevaluasi aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan guna memperoleh konfigurasi sistem yang optimal.

Net Present Cost (NPC) dan Cost of energy (COE)

NPC merupakan total biaya sistem selama umur proyek, sedangkan COE menunjukkan biaya rata-rata produksi energi listrik per kWh. Kedua parameter ini digunakan untuk menilai kelayakan ekonomi sistem energi hibrida.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif berbasis simulasi untuk menganalisis kinerja teknis dan ekonomi sistem pembangkit listrik hibrida yang terdiri atas PLTS, PLTB, dan PLTSa yang terintegrasi dengan jaringan listrik. Simulasi dan optimasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*) untuk memperoleh konfigurasi sistem yang optimal berdasarkan aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan.

Data yang digunakan dalam penelitian meliputi data beban listrik, data radiasi matahari, data kecepatan angin, dan data potensi sampah sebagai sumber energi PLTSa. Data beban listrik digunakan untuk membentuk

profil konsumsi energi harian yang menjadi dasar dalam simulasi sistem. Data radiasi matahari dan kecepatan angin digunakan untuk memperkirakan potensi produksi energi dari PLTS dan PLTB, sedangkan data timbunan sampah digunakan untuk menentukan kapasitas pembangkitan energi pada PLTSa. Seluruh data tersebut kemudian dimasukkan ke dalam HOMER Pro sebagai parameter simulasi dan optimasi sistem.

Kapasitas komponen sistem hibrida ditentukan berdasarkan potensi area pemasangan dan hasil optimasi menggunakan HOMER Pro. Kapasitas PLTS diperoleh dari analisis luas atap efektif yang tersedia pada setiap bangunan, sedangkan kapasitas PLTB ditentukan berdasarkan area efektif pemasangan turbin dan jumlah turbin yang dapat ditempatkan pada lokasi penelitian. Selain itu, sistem dilengkapi dengan PLTSa sebagai sumber energi tambahan, konverter, dan jaringan listrik PLN sebagai sumber energi pendukung. Parameter perancangan dan kapasitas komponen yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan pada Tabel 1. Dibawah ini.

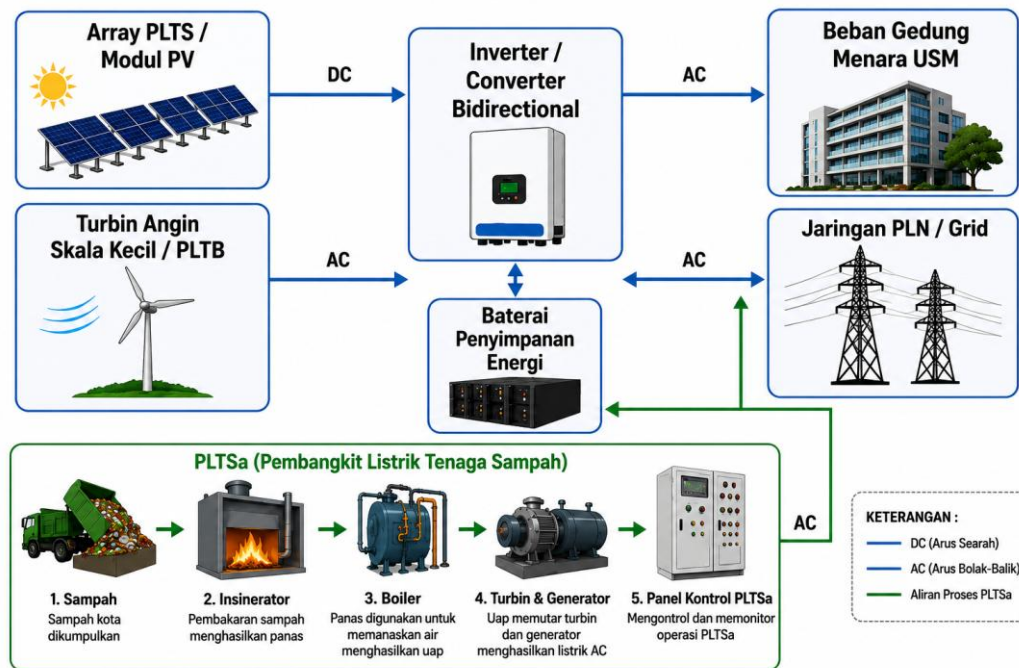
Tabel 1.
Parameter Perancangan dan Simulasi Sistem Hibrida PLTS–PLTB–PLTSa

Komponen	Lokasi	Luas Atap (m ²)	Faktor Efektif (%)	Luas Efektif (m ²)	Jumlah Unit	Kapasitas Simulasi (kW)
PLTS	Gedung Menara	540	70	378	170 panel	60
	Parkiran	244	70	171	78 panel	30
	Kantin	272	70	190	86 panel	35
	Gedung M	617	70	432	196 panel	80
	GOR USM	1.847	70	1.293	588 panel	230
PLTB	Gedung Menara	540	20	108	6 turbin	18
	Parkiran	244	20	49	4 turbin	12
PLTSa	Basemant	–	–	–	1 unit	10
Converter	Sistem	–	–	–	1 unit	300

Komponen	Lokasi	Luas Atap (m ²)	Faktor Efektif (%)	Luas Efektif (m ²)	Jumlah Unit	Kapasitas Simulasi (kW)
Grid PLN	Sistem	–	–	–	Terhubung	–

Sistem yang dimodelkan terdiri atas PLTS dengan kapasitas total 435 kW, PLTB sebesar 30 kW, PLTSa sebesar 10 kW, konverter bidirectional 300 kW, dan jaringan listrik PLN. Konverter bidirectional berfungsi sebagai penghubung antara sisi DC dan AC sistem, memungkinkan konversi daya dua arah dari PLTS dan baterai ke beban AC maupun dari jaringan listrik

ke baterai saat proses pengisian energi. Pemilihan kapasitas konverter disesuaikan dengan kapasitas total pembangkit dan kebutuhan transfer daya maksimum pada sistem. Seluruh komponen diintegrasikan dalam satu sistem pembangkit listrik hibrida untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dengan tingkat pemanfaatan energi terbarukan yang tinggi.



Gambar 1.

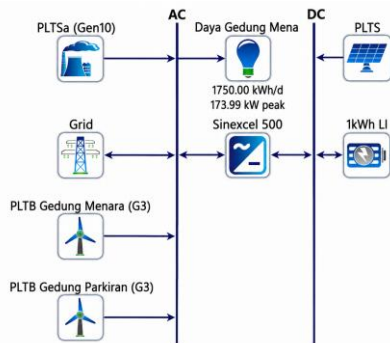
Diagram Konfigurasi Sistem Hibrida PLTS, PLTB, dan PLTSa yang Terhubung dengan Jaringan PLN dan Baterai Penyimpanan Energi

Gambar 1 menunjukkan arsitektur sistem pembangkit listrik hibrida yang digunakan dalam penelitian. Energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS, PLTB, dan PLTSa disalurkan menuju sistem distribusi melalui konverter untuk memenuhi kebutuhan beban listrik. Jaringan listrik PLN berfungsi

sebagai sumber energi pendukung ketika produksi energi terbarukan tidak mampu memenuhi kebutuhan beban. Sebaliknya, apabila terjadi kelebihan produksi energi, energi tersebut dapat disalurkan kembali ke jaringan listrik sesuai dengan skema operasi sistem yang diterapkan.

Setelah arsitektur sistem ditentukan, seluruh komponen dimodelkan ke dalam perangkat lunak HOMER Pro sesuai dengan karakteristik teknis masing-masing komponen. Pemodelan dilakukan dengan memasukkan parameter kapasitas pembangkit, data sumber daya energi, profil beban listrik, biaya investasi, biaya operasi dan pemeliharaan, biaya penggantian komponen, serta parameter ekonomi lainnya yang diperlukan dalam simulasi.

Tahap berikutnya adalah melakukan simulasi dan optimasi menggunakan HOMER Pro. Pada tahap ini perangkat lunak HOMER Pro melakukan evaluasi terhadap berbagai kemungkinan operasi sistem berdasarkan kondisi sumber daya energi dan kebutuhan beban listrik. Hasil simulasi menghasilkan informasi mengenai produksi energi tahunan, konsumsi energi, energi yang dibeli dan dijual ke jaringan listrik, kontribusi energi terbarukan, biaya sistem, serta emisi yang dihasilkan.



Gambar 2.
Schematic Sistem Hibrida PLTS–PLTB–
PLTSa pada HOMER Pro

Gambar 2 menunjukkan tampilan *schematic design* sistem pada HOMER Pro yang digunakan dalam penelitian. Diagram tersebut menggambarkan hubungan antar komponen pembangkit, jaringan listrik, konverter, dan beban listrik yang dianalisis. Model ini menjadi dasar dalam proses simulasi dan optimasi untuk memperoleh

konfigurasi sistem yang memiliki tingkat keandalan tinggi dengan biaya sistem minimum.

Analisis hasil simulasi dilakukan berdasarkan parameter teknis dan ekonomi yang dihasilkan oleh HOMER Pro. Parameter teknis yang dianalisis meliputi produksi energi tahunan, kontribusi energi terbarukan (*renewable fraction*), energi berlebih (*excess electricity*), kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan beban listrik, serta emisi karbon yang dihasilkan. Sementara itu, parameter ekonomi yang digunakan meliputi NPC, COE, biaya investasi awal, biaya operasi dan pemeliharaan, serta biaya penggantian komponen selama umur proyek.

Nilai NPC digunakan untuk menentukan total biaya sistem selama umur proyek dan dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$NPC = \frac{C_{ann,total}}{CRF(i,N)} \quad (1)$$

Dengan $C_{ann,total}$ merupakan total biaya tahunan sistem, (i) merupakan tingkat suku bunga, (N) merupakan umur proyek, dan (CRF) adalah *Capital Recovery Factor*. Nilai COE digunakan untuk menentukan biaya produksi energi listrik per satuan energi yang dihasilkan dan dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$COE = \frac{C_{ann,total}}{E_{served}} \quad (2)$$

Dengan E_{served} merupakan total energi listrik yang berhasil dilayani oleh sistem selama periode simulasi. Kontribusi energi terbarukan terhadap total produksi energi dihitung menggunakan *Renewable Fraction* (RF) sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$COE = \frac{E_{renewable}}{E_{total}} \quad (3)$$

Dengan $E_{renewable}$ merupakan energi yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan dan E_{total} merupakan total energi yang diproduksi oleh

sistem. Konfigurasi sistem yang memiliki nilai NPC dan COE terendah, kontribusi energi terbarukan tertinggi, serta mampu memenuhi kebutuhan beban listrik tanpa kekurangan daya (*unmet load*) dipilih sebagai konfigurasi optimal dan selanjutnya dianalisis pada bagian hasil dan pembahasan.

HASIL PENELITIAN

Analisis Kinerja Sistem Hibrida PLTS–PLTB–PLTSa

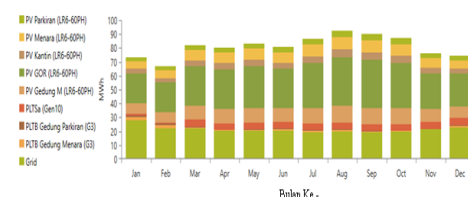
Berdasarkan hasil optimasi menggunakan perangkat lunak HOMER Pro, konfigurasi sistem yang paling optimal terdiri atas kombinasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa), konverter, dan jaringan listrik PLN yang terintegrasi dalam satu sistem *grid-connected*. Sistem yang dirancang memiliki total kapasitas PLTS sebesar 435 kW yang tersebar pada lima lokasi pemasangan, yaitu Gedung Menara (60 kW), Parkiran (30 kW), Kantin (35 kW), Gedung M (80 kW), dan GOR USM (230 kW). Selain itu, sistem dilengkapi dengan PLTB berkapasitas total 30 kW yang terdiri atas PLTB Gedung Menara sebesar 18 kW dan PLTB Parkiran sebesar 12 kW. Sebagai sumber energi tambahan digunakan PLTSa berkapasitas 10 kW dan konverter berkapasitas 300 kW. Integrasi seluruh komponen tersebut menghasilkan sistem pembangkit listrik hibrida yang mampu memanfaatkan berbagai sumber energi terbarukan secara simultan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa total energi listrik yang diproduksi sistem mencapai 972.876 kWh/tahun. Energi tersebut berasal dari kombinasi pembangkit energi terbarukan dan energi yang dibeli dari jaringan listrik PLN. Distribusi produksi energi dari

masing-masing komponen ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2.
Produksi Energi Tahunan Sistem Hibrida PLTS–PLTB–PLTSa

Komponen	Produksi Energi (kWh/tahun)	Kontribusi (%)
PV Gedung Menara	89.601	9,21
PV Gedung Parkiran	44.801	4,60
PV Gedung Kantin	52.267	5,37
PV Gedung M	119.468	12,28
PV GOR USM	343.471	35,30
PLTSa Basemant	49.168	5,05
PLTB Gedung Menara	11.404	1,17
PLTB Gedung Parkiran	7.603	0,78
Grid Purchase	255.092	26,20
Total	972.876	100,00

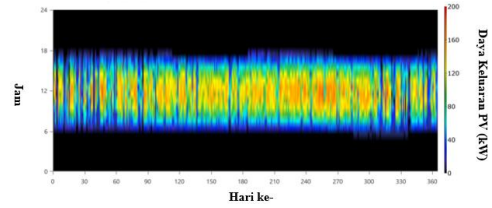
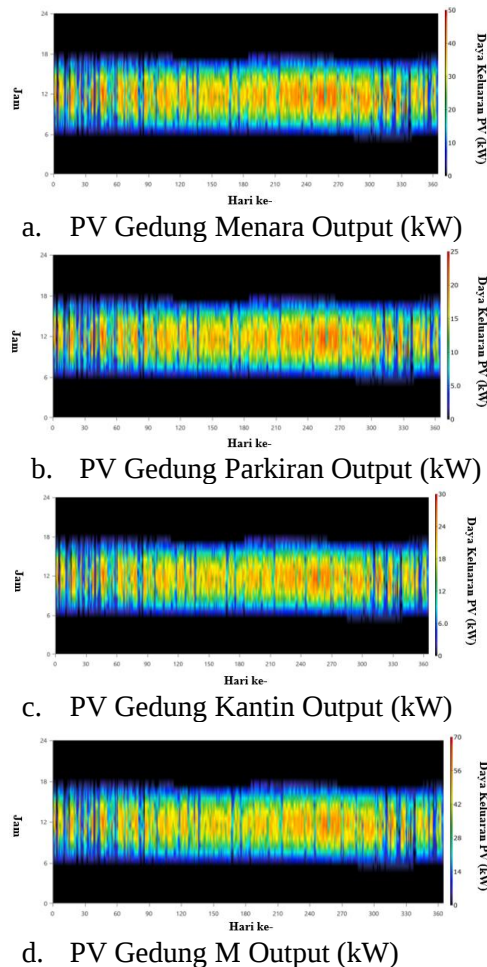
Gambar 3, menunjukkan kontribusi pasokan energi bulanan pada sistem hibrida PLTS–PLTB–PLTSa yang terintegrasi dengan jaringan listrik PLN. Total pasokan energi sistem mengalami fluktuasi sepanjang tahun, dengan nilai tertinggi terjadi pada bulan Agustus sekitar 92 MWh dan terendah pada bulan Februari sekitar 67 MWh. Variasi tersebut terutama dipengaruhi oleh perubahan produksi energi terbarukan, khususnya energi surya yang menjadi sumber energi dominan dalam sistem.



Gambar 3.

Kontribusi Pasokan Energi Bulanan Sistem Hibrida PLTS–PLTB–PLTSa Terintegrasi Grid.

Gambar 4, menunjukkan profil produksi energi dari seluruh unit PLTS yang digunakan pada penelitian ini. Secara umum, seluruh sistem PLTS memperlihatkan pola produksi energi yang serupa dengan periode pembangkitan utama terjadi pada siang hari ketika intensitas radiasi matahari berada pada nilai maksimum. Variasi warna pada grafik menunjukkan perubahan keluaran daya yang dipengaruhi oleh kondisi cuaca, tingkat tutupan awan, serta variasi intensitas penyinaran matahari sepanjang tahun. Meskipun terdapat fluktuasi harian dan musiman, seluruh sistem PLTS mampu menghasilkan energi secara konsisten selama periode simulasi.

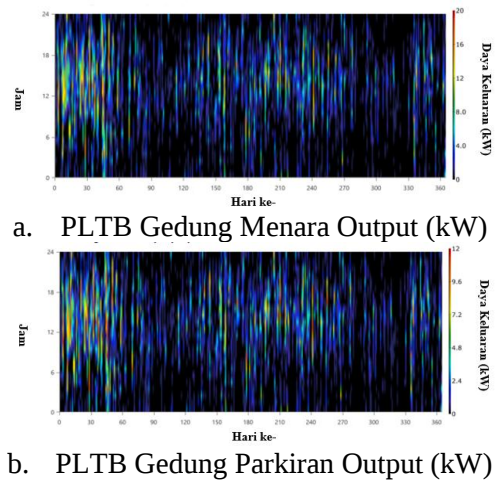


e. PV GOR USM Output (kW)

Gambar 4.

Profil Produksi Energi Tahunan PLTS pada (a) Gedung Menara, (b) Parkiran, (c) Kantin, (d) Gedung M, dan (e) GOR USM hasil simulasi HOMER Pro

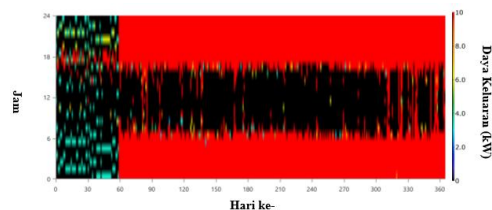
Gambar 5, menunjukkan profil produksi energi dari seluruh unit PLTB yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 5.

Profil Produksi Energi PLTB pada (a) Gedung Menara dan (b) Parkiran

Gambar 6, menunjukkan bahwa PLTSa mampu menghasilkan energi secara relatif stabil sepanjang tahun. Berbeda dengan PLTS dan PLTB yang sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, PLTSa memanfaatkan sampah sebagai bahan bakar sehingga kontinuitas produksinya lebih terjaga.



Gambar 6.

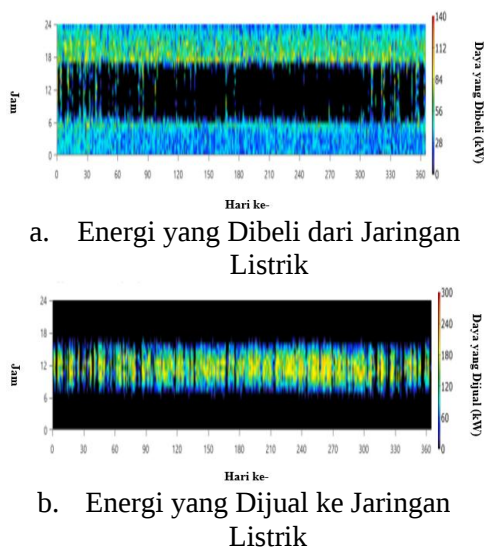
Profil Operasi PLTSa Basemant

Kinerja keseluruhan sistem ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3.
Ringkasan Kinerja Sistem Hibrida

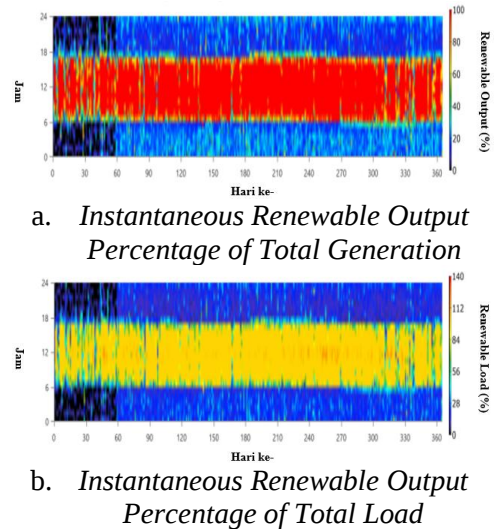
Parameter	Nilai	Satuan
Total Produksi Energi	972.876	kWh/tahun
Total Konsumsi Energi	954.444	kWh/tahun
AC Primary Load	638.750	kWh/tahun
Grid Sales	315.694	kWh/tahun
Excess Electricity	3.374	kWh/tahun
Unmet Electric Load	0	kWh/tahun
Capacity Shortage	0	kWh/tahun

Gambar 7, menunjukkan pola pembelian energi dari jaringan listrik selama satu tahun operasi. Pembelian energi umumnya terjadi ketika produksi energi terbarukan tidak mampu memenuhi kebutuhan beban, terutama pada malam hari atau ketika intensitas radiasi matahari rendah.



Gambar 7.
Pola Pembelian Energi

Gambar 8, hasil *Renewable Summary*



Gambar 8.
Renewable Summary Sistem Hibrida

Analisis Kelayakan Ekonomi Sistem Hibrida

Analisis ekonomi dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kelayakan penerapan sistem hibrida PLTS–PLTB–PLTSa terintegrasi jaringan listrik dalam memenuhi kebutuhan energi listrik kampus. Evaluasi dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro dengan mempertimbangkan parameter ekonomi utama berupa NPC, COE, biaya investasi awal (*capital cost*), biaya operasi dan pemeliharaan (*operating cost*), biaya penggantian komponen (*replacement cost*), serta nilai sisa komponen (*salvage value*). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menghasilkan energi listrik secara ekonomis selama umur proyek yang direncanakan.

Tabel 4.
Ringkasan Parameter Ekonomi Sistem Hibrida

Parameter	Nilai
Net Present Cost	Rp. 13.845.530.000
Cost of energy	Rp. 1.122/kWh
Capital Cost	Rp. 1.270.000.000
Operating Cost	Rp. 11.800.000.000

Replacement Cost	Rp. 841.000.000
Salvage Value	Rp. 81.400.000
Resource Cost	Rp. 5.730.000
Annualized Cost	Rp.1.070.000.000/tahun

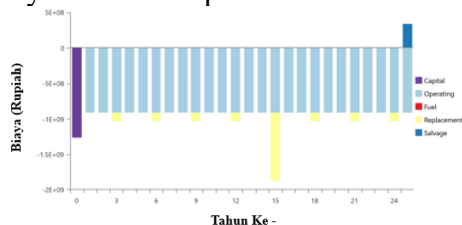
Gambar 9, menunjukkan distribusi biaya sistem berdasarkan masing-masing komponen dan kategori biaya selama umur proyek.



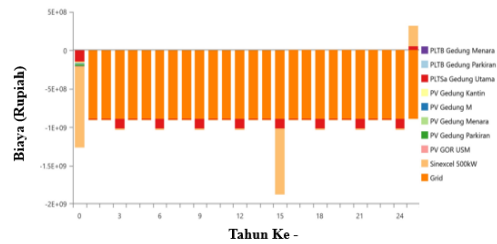
Gambar 9.

Cost Summary Sistem Hibrida Hasil Simulasi HOMER Pro

Profil arus kas yang ditunjukkan pada Gambar 10, memperlihatkan distribusi biaya sistem selama umur proyek. Pengeluaran terbesar terjadi pada tahun pertama akibat kebutuhan investasi pembangunan sistem. Setelah sistem mulai beroperasi, biaya tahunan relatif stabil dan didominasi oleh biaya operasi serta pemeliharaan. Pada beberapa periode tertentu terjadi peningkatan pengeluaran akibat penggantian komponen yang telah mencapai umur pakainya. Namun demikian, pada akhir umur proyek terdapat nilai *salvage value* yang memberikan pengembalian ekonomi sehingga mampu mengurangi total biaya siklus hidup sistem.



a. *Cash Flow kategori biaya*



b. *Cash Flow komponen sistem*

Gambar 10.

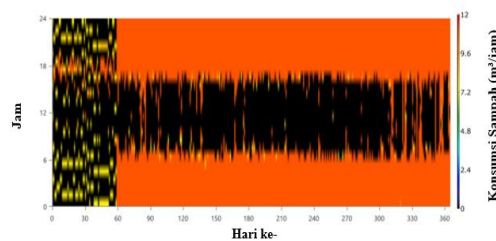
Arus kas (*cash flow*) sistem hibrida PLTS–PLTB–PLTSa selama umur proyek berdasarkan hasil simulasi HOMER Pro

Analisis Lingkungan dan Pengurangan Emisi

Selain aspek teknis dan ekonomi, keberhasilan implementasi sistem energi hibrida juga ditentukan oleh dampaknya terhadap lingkungan. Oleh karena itu, analisis lingkungan dilakukan untuk mengevaluasi kontribusi sistem hibrida PLTS–PLTB–PLTSa terintegrasi jaringan listrik dalam mengurangi emisi gas rumah kaca serta meningkatkan pemanfaatan energi bersih. Sistem yang dirancang pada penelitian ini memanfaatkan kombinasi energi surya, energi angin, energi dari sampah, dan jaringan listrik PLN untuk memenuhi kebutuhan energi listrik kampus. Hasil simulasi HOMER Pro menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai *renewable fraction* sebesar 75,2%, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar kebutuhan energi listrik telah dipenuhi oleh sumber energi terbarukan. Tingginya kontribusi energi terbarukan tersebut menjadi faktor utama dalam upaya pengurangan emisi dan peningkatan keberlanjutan sistem energi yang dirancang.

Kontribusi terbesar terhadap produksi energi terbarukan berasal dari sistem PLTS yang menghasilkan energi sebesar 649.608 kWh/tahun atau sekitar 66,77% dari total produksi energi sistem. Selain itu, PLTB menghasilkan energi sebesar 19.007 kWh/tahun, sedangkan PLTSa menghasilkan energi

sebesar 49.168 kWh/tahun. Secara keseluruhan, ketiga sumber energi terbarukan tersebut menghasilkan energi sebesar 717.784 kWh/tahun atau sekitar 73,8% dari total produksi energi sistem. Tingginya produksi energi terbarukan tersebut berkontribusi langsung terhadap pengurangan ketergantungan pada energi konvensional dan menurunkan kebutuhan pembelian energi dari jaringan listrik.



Gambar 11.

Profil Konsumsi Sampah (*Municipal Solid Waste/MSW*) pada PLTSa Hasil Simulasi HOMER Pro

Berdasarkan Gambar 11, PLTSa Gedung Utama mengonsumsi sampah kota (*Municipal Solid Waste/MSW*) sebesar 88,7 ton/tahun atau sekitar 0,243 ton/hari. Profil konsumsi yang relatif stabil sepanjang tahun menunjukkan bahwa pasokan bahan bakar sampah mampu mendukung kontinuitas operasi PLTSa dalam sistem hibrida. Pemanfaatan sampah sebagai sumber energi memberikan manfaat ganda, yaitu menghasilkan energi listrik sekaligus mengurangi volume limbah yang harus ditangani oleh sistem pengelolaan sampah. Dengan demikian, keberadaan PLTSa tidak hanya berfungsi sebagai pembangkit listrik tambahan tetapi juga sebagai solusi pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan.

Berdasarkan Tabel 5, emisi terbesar yang dihasilkan sistem adalah karbon dioksida (CO_2) sebesar 161.232 kg/tahun. Selain itu, sistem

menghasilkan sulfur dioksida (SO_2) sebesar 699 kg/tahun dan nitrogen oksida (NO_x) sebesar 344 kg/tahun. Emisi karbon monoksida (CO), hidrokarbon tak terbakar, dan partikulat berada pada tingkat yang relatif rendah. Meskipun sistem masih menghasilkan emisi akibat interaksi dengan jaringan listrik dan proses konversi energi pada PLTSa, jumlah emisi tersebut lebih rendah dibandingkan sistem yang sepenuhnya bergantung pada energi berbasis fosil. Kondisi ini menunjukkan bahwa integrasi energi terbarukan dalam sistem mampu memberikan dampak positif terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca.

Tabel 5.

Emisi Sistem Hibrida Hasil Simulasi HOMER Pro

Polutan	Nilai	Satuan
Carbon Dioxide (CO_2)	161.232	kg/tahun
Carbon Monoxide (CO)	1,75	kg/tahun
Unburned Hydrocarbons	0,0639	kg/tahun
Particulate Matter	0,106	kg/tahun
Sulfur Dioxide (SO_2)	699	kg/tahun
Nitrogen Oxides (NO_x)	344	kg/tahun

PEMBAHASAN

Analisis Kinerja Sistem Hibrida PLTS–PLTB–PLTSa

Berdasarkan Tabel 2, total pasokan energi pada sistem hibrida mencapai 972.876 kWh/tahun yang berasal dari kombinasi sumber energi terbarukan dan energi yang dibeli dari jaringan listrik PLN. Energi terbarukan yang dihasilkan oleh PLTS, PLTB, dan PLTSa mencapai 717.784 kWh/tahun atau sekitar 73,8% dari total pasokan energi sistem, sedangkan energi yang dibeli dari jaringan listrik (Grid Purchase) sebesar 255.092 kWh/tahun atau 26,20%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem masih

memanfaatkan jaringan PLN sebagai sumber energi pendukung untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik ketika produksi energi terbarukan tidak mampu memenuhi kebutuhan beban. Meskipun demikian, kontribusi energi terbarukan yang lebih dominan menunjukkan bahwa sistem telah mampu mengurangi ketergantungan terhadap energi konvensional secara signifikan. Kontribusi energi terbesar berasal dari PLTS GOR USM dengan produksi energi sebesar 343.471 kWh/tahun atau 35,30% dari total pasokan energi sistem. Tingginya kontribusi tersebut menunjukkan bahwa kapasitas terpasang merupakan faktor utama yang memengaruhi jumlah energi yang dihasilkan. Secara keseluruhan, seluruh unit PLTS menghasilkan energi sebesar 649.608 kWh/tahun atau sekitar 66,77% dari total pasokan energi sistem. Hasil ini menunjukkan bahwa energi surya menjadi tulang punggung sistem pembangkit yang dirancang dan berperan sebagai sumber energi utama dalam memenuhi kebutuhan listrik.

Berdasarkan Gambar 3, Kontribusi energi terbesar berasal dari PV GOR USM, diikuti oleh PV Gedung M, PV Gedung Menara, PV Gedung Kantin, dan PV Gedung Parkiran. Dominasi produksi energi dari PLTS menunjukkan bahwa sumber energi surya merupakan tulang punggung sistem dalam memenuhi kebutuhan listrik Gedung Menara Universitas Semarang. Sementara itu, PLTB Gedung Menara, PLTB Gedung Parkiran, dan PLTSa Gedung Utama berperan sebagai sumber energi pelengkap yang membantu meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan dan diversifikasi pasokan energi.

Selain energi yang dihasilkan oleh pembangkit terbarukan, sistem juga memperoleh pasokan energi dari

jaringan listrik PLN (Grid) yang berfungsi sebagai sumber energi pendukung ketika produksi energi terbarukan tidak mencukupi kebutuhan beban. Meskipun demikian, kontribusi energi terbarukan tetap mendominasi sistem dengan total produksi sebesar 717.784 kWh/tahun atau sekitar 73,8% dari total pasokan energi tahunan. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi PLTS, PLTB, dan PLTSa mampu meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap pasokan energi dari jaringan listrik.

Berdasarkan Gambar 4, PLTS GOR USM menghasilkan energi terbesar karena memiliki kapasitas terpasang paling tinggi, yaitu 230 kW. Sementara itu, PLTS Gedung Menara, Gedung M, Kantin, dan Parkiran menunjukkan pola produksi yang serupa dengan skala keluaran daya yang berbeda sesuai kapasitas masing-masing. Faktor kapasitas seluruh sistem PLTS berada pada kisaran 17%, yang menunjukkan bahwa performa sistem fotovoltaik berada pada kondisi yang baik untuk wilayah tropis. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Hong et al., 2023) yang melaporkan bahwa sistem PLTS atap pada wilayah tropis umumnya memiliki faktor kapasitas antara 15–20%. Selain itu (Gopi et al., 2021) menyatakan bahwa variasi produksi energi PLTS sangat dipengaruhi oleh perubahan musim dan curah hujan sehingga produksi energi cenderung lebih tinggi pada musim kemarau dibandingkan musim hujan.

Selain energi surya, sistem juga memanfaatkan energi angin melalui dua unit PLTB yang dipasang pada Gedung Menara dan area Parkiran. Total energi yang dihasilkan oleh kedua unit PLTB mencapai 19.007 kWh/tahun atau sekitar 1,95% dari total produksi energi sistem. Meskipun kontribusinya relatif

kecil dibandingkan PLTS, keberadaan PLTB tetap memberikan manfaat sebagai sumber energi pelengkap yang mendukung diversifikasi energi terbarukan.

Berdasarkan Gambar 5, keluaran daya PLTB menunjukkan fluktuasi yang lebih besar dibandingkan sistem PLTS karena sangat dipengaruhi oleh variasi kecepatan angin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PLTB Gedung Menara menghasilkan energi sebesar 11.404 kWh/tahun, sedangkan PLTB Parkiran menghasilkan energi sebesar 7.603 kWh/tahun. Faktor kapasitas PLTB berada pada kisaran 7,23%, yang menunjukkan bahwa potensi energi angin pada lokasi penelitian relatif rendah. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Gabra et al., 2019) yang menyatakan bahwa turbin angin skala kecil pada daerah dengan kecepatan angin rendah umumnya menghasilkan kontribusi energi yang terbatas. Meskipun demikian, penelitian (Iqbar et al., 2022) menunjukkan bahwa integrasi energi angin ke dalam sistem hibrida dapat meningkatkan keandalan sistem dan mengurangi ketergantungan terhadap satu jenis sumber energi. Oleh karena itu, keberadaan PLTB tetap memberikan kontribusi positif terhadap diversifikasi energi dan peningkatan keandalan sistem.

Selain PLTS dan PLTB, sistem juga memanfaatkan PLTSa sebagai sumber energi berbasis biomassa yang berasal dari sampah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PLTSa menghasilkan energi sebesar 49.168 kWh/tahun atau sekitar 5,05% dari total produksi energi sistem. Sistem ini beroperasi selama 5.102 jam/tahun dengan faktor kapasitas mencapai 56,1%, jauh lebih tinggi dibandingkan PLTS maupun PLTB.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mengonsumsi sampah

sebesar 88,7 ton/tahun dengan efisiensi listrik rata-rata mencapai 51,2%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan sampah sebagai sumber energi memiliki prospek yang baik untuk mendukung sistem energi berkelanjutan. Penelitian (Sesotyo et al., 2019) menunjukkan bahwa teknologi plasma gasification mampu meningkatkan pemanfaatan energi dari sampah melalui produksi syngas dengan kandungan hidrogen yang tinggi serta emisi CO₂ yang rendah, sehingga teknologi waste-to-energy tidak hanya berkontribusi terhadap penyediaan energi tetapi juga mendukung pengelolaan lingkungan yang lebih baik. Tingginya faktor kapasitas menunjukkan bahwa PLTSa berperan sebagai pembangkit *base load* yang membantu menjaga kestabilan suplai energi pada sistem hibrida. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Tiwary et al., 2019) yang menyatakan bahwa teknologi *waste-to-energy* mampu memberikan kontribusi energi yang signifikan sekaligus mengurangi volume limbah yang harus ditangani oleh sistem pengelolaan sampah. Penelitian (Kuznetsova et al., 2019) juga menunjukkan bahwa integrasi teknologi konversi sampah menjadi energi mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan limbah dan mendukung pengelolaan lingkungan yang lebih berkelanjutan.

Berdasarkan Tabel 3, sistem menunjukkan tingkat keandalan yang sangat baik. Nilai *unmet electric load* dan *capacity shortage* sebesar 0 kWh/tahun menunjukkan bahwa seluruh kebutuhan energi listrik dapat dipenuhi tanpa mengalami kekurangan pasokan daya selama periode simulasi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kapasitas pembangkit yang dipasang telah sesuai dengan karakteristik beban yang dilayani. Selain itu, nilai *excess*

electricity hanya sebesar 3.374 kWh/tahun atau sekitar 0,35% dari total energi yang diproduksi. Nilai tersebut menunjukkan bahwa energi yang tidak termanfaatkan sangat kecil sehingga sistem dapat dikatakan telah dirancang secara optimal. Menurut (Wang et al., 2021), sistem hibrida dengan nilai *unmet load* mendekati nol dan energi berlebih yang rendah umumnya memiliki efisiensi teknis dan ekonomi yang lebih baik karena kapasitas pembangkit dapat dimanfaatkan secara maksimal. Meskipun sistem didominasi oleh sumber energi terbarukan, jaringan listrik PLN tetap berperan sebagai sumber energi pendukung. Hasil simulasi menunjukkan bahwa energi yang dibeli dari jaringan listrik mencapai 255.092 kWh/tahun atau sekitar 26,20% dari total produksi energi sistem. Besarnya energi yang dibeli dari jaringan listrik menunjukkan bahwa meskipun sistem memiliki kontribusi energi terbarukan yang tinggi, pasokan listrik dari PLTS, PLTB, dan PLTSa belum sepenuhnya mampu memenuhi kebutuhan beban pada setiap waktu operasi. Kondisi ini terutama terjadi ketika produksi energi surya menurun pada malam hari atau saat intensitas radiasi matahari rendah, serta ketika keluaran daya PLTB mengalami fluktuasi akibat perubahan kecepatan angin. Oleh karena itu, jaringan listrik PLN berfungsi sebagai sumber energi pendukung yang menjaga kontinuitas pasokan listrik dan menjamin seluruh kebutuhan beban dapat terpenuhi. Keberadaan grid juga meningkatkan keandalan sistem karena memungkinkan terjadinya pertukaran energi secara dua arah, yaitu pembelian energi ketika produksi energi terbarukan tidak mencukupi dan penjualan energi ketika terjadi surplus produksi.

Hasil simulasi pada **Gambar 7**, menunjukkan bahwa energi yang dijual

ke jaringan listrik mencapai 315.694 kWh/tahun, lebih besar dibandingkan energi yang dibeli dari jaringan. Kondisi tersebut menghasilkan nilai *net energy purchased* sebesar -60.602 kWh/tahun yang menunjukkan bahwa sistem beroperasi sebagai *net exporter*. Artinya, energi yang dihasilkan oleh sistem lebih besar dibandingkan energi yang diserap dari jaringan listrik. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan energinya sendiri tetapi juga berpotensi memberikan manfaat ekonomi melalui mekanisme ekspor energi ke jaringan listrik.

Berdasarkan **Gambar 8**, hasil *Renewable Summary*, total energi yang berasal dari sumber energi terbarukan mencapai 717.784 kWh/tahun atau sekitar 73,8% dari total produksi energi sistem. Nilai *renewable fraction* yang diperoleh sebesar 75,2%, yang menunjukkan bahwa lebih dari tiga perempat kebutuhan energi listrik telah dipenuhi oleh sumber energi terbarukan. Nilai tersebut tergolong tinggi dibandingkan berbagai penelitian sistem hibrida yang umumnya menghasilkan *renewable fraction* pada kisaran 40–70%. Khosravani dkk., (Khosravani et al., 2022) menyatakan bahwa sistem dengan *renewable fraction* antara 55–75% umumnya telah mencapai kondisi optimal karena mampu menyeimbangkan aspek keandalan sistem dan biaya energi. Oleh karena itu, nilai *renewable fraction* sebesar 75,2% yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi PLTS, PLTB, dan PLTSa berhasil meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan secara signifikan tanpa mengurangi keandalan sistem.

Analisis Kelayakan Ekonomi Sistem Hibrida

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 4, sistem hibrida menghasilkan nilai NPC sebesar Rp13.845.530.000 dan COE sebesar Rp1.122/kWh. Nilai NPC menunjukkan total biaya siklus hidup sistem selama umur proyek setelah mempertimbangkan faktor diskonto, sedangkan COE menggambarkan biaya rata-rata yang diperlukan untuk menghasilkan satu kilowatt-jam energi listrik. Nilai COE yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan energi listrik dengan biaya yang kompetitif untuk aplikasi jangka panjang. Hasil ini sejalan dengan berbagai penelitian sistem energi hibrida terintegrasi jaringan listrik yang melaporkan nilai COE berkisar antara US\$0,0446–0,072/kWh tergantung pada konfigurasi sistem, kapasitas pembangkit, dan kondisi lokasi. (Riayatsyah et al., 2022) melaporkan nilai COE sebesar US\$0,0446/kWh pada sistem PLTS-grid di lingkungan perguruan tinggi, sedangkan (Singh et al., 2021) memperoleh nilai COE sebesar US\$0,038/kWh pada sistem hibrida surya-angin terintegrasi jaringan listrik. Temuan tersebut menunjukkan bahwa integrasi sumber energi terbarukan mampu menurunkan biaya energi secara signifikan dibandingkan sistem yang hanya bergantung pada jaringan listrik konvensional.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa biaya investasi awal (*capital cost*) sistem mencapai Rp1,27 miliar. Investasi tersebut mencakup pembangunan PLTS, PLTB, PLTSa, inverter, serta komponen pendukung lainnya. Besarnya biaya investasi awal merupakan karakteristik umum sistem energi terbarukan karena sebagian besar biaya dikeluarkan pada tahap pembangunan. Meskipun demikian, investasi awal yang tinggi dapat dikompensasi oleh rendahnya biaya

bahan bakar dan meningkatnya produksi energi terbarukan selama masa operasional sistem. Selain itu, nilai *renewable fraction* yang mencapai 75,2% menunjukkan bahwa sebagian besar kebutuhan energi listrik telah dipenuhi oleh sumber energi terbarukan sehingga ketergantungan terhadap energi konvensional dapat dikurangi secara signifikan.

Hasil simulasi pada Gambar 9, memperlihatkan bahwa biaya operasi (*operating cost*) merupakan komponen biaya terbesar dengan nilai mencapai Rp11,8 miliar atau lebih dari 80% total NPC sistem. Tingginya biaya operasi terutama disebabkan oleh transaksi energi dengan jaringan listrik PLN yang masih digunakan sebagai sumber energi pendukung ketika produksi energi terbarukan tidak mencukupi kebutuhan beban. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun sistem telah memiliki kontribusi energi terbarukan yang tinggi, biaya energi dari jaringan listrik masih memberikan pengaruh yang signifikan terhadap total biaya sistem.

Dominasi biaya operasi terhadap total NPC juga ditemukan pada berbagai penelitian sistem energi hibrida. (Oladigbolu et al., 2020) menunjukkan bahwa harga energi, biaya investasi komponen utama, tingkat suku bunga, serta biaya penggantian komponen merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap perubahan nilai NPC. Oleh karena itu, peningkatan produksi energi terbarukan dan pengurangan pembelian energi dari jaringan listrik menjadi strategi yang efektif untuk menurunkan biaya siklus hidup sistem secara keseluruhan.

Selain biaya operasi, sistem juga memerlukan biaya penggantian komponen (*replacement cost*) sebesar Rp841 juta selama umur proyek. Biaya tersebut terutama berasal dari inverter dan unit PLTSa yang memiliki umur

operasional lebih pendek dibandingkan umur proyek secara keseluruhan. Di sisi lain, sistem masih memiliki nilai sisa (*salvage value*) sebesar Rp81,4 juta pada akhir umur proyek yang berkontribusi dalam mengurangi total biaya sistem. Keberadaan *salvage value* menunjukkan bahwa sebagian komponen masih memiliki nilai ekonomis setelah proyek berakhir sehingga memberikan manfaat ekonomi tambahan bagi sistem.

Komponen PLTS memberikan kontribusi yang sangat penting terhadap performa ekonomi sistem. Dengan total produksi energi mencapai 649.608 kWh/tahun atau sekitar 66,77% dari total energi yang dihasilkan, PLTS menjadi sumber energi utama dalam sistem hibrida yang dirancang. Besarnya produksi energi yang dihasilkan mampu mengurangi kebutuhan pembelian energi dari jaringan listrik sehingga secara langsung menurunkan biaya operasional sistem. Di antara seluruh unit PLTS, PLTS GOR USM memberikan kontribusi energi terbesar yaitu 343.471 kWh/tahun, sehingga memiliki peran paling signifikan dalam meningkatkan efisiensi ekonomi sistem.

Selain PLTS, keberadaan PLTSa juga memberikan manfaat ekonomi yang penting. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PLTSa menghasilkan energi sebesar 49.168 kWh/tahun dengan faktor kapasitas mencapai 56,1%, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya. Pemanfaatan sampah sebagai bahan bakar memungkinkan sistem menghasilkan energi listrik sekaligus mengurangi volume limbah yang harus ditangani. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Kuznetsova et al., 2019) yang menunjukkan bahwa integrasi teknologi *waste-to-energy* mampu menurunkan

biaya operasional pengelolaan sampah hingga sekitar 50% serta meningkatkan pendapatan dari pemanfaatan energi yang dihasilkan. Dengan demikian, PLTSa tidak hanya memberikan manfaat energi tetapi juga meningkatkan nilai ekonomi dari pengelolaan limbah kampus.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa biaya tahunan ekuivalen (*annualized cost*) sistem mencapai sekitar Rp1,07 miliar per tahun. Sebagian besar biaya tahunan berasal dari biaya operasi, sedangkan sisanya berasal dari biaya modal dan biaya penggantian komponen. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa strategi pengurangan pembelian energi dari jaringan listrik melalui peningkatan produksi energi terbarukan berpotensi memberikan dampak yang signifikan terhadap penurunan biaya operasional sistem. Temuan ini sejalan dengan berbagai studi yang menunjukkan bahwa peningkatan kontribusi energi terbarukan dapat mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi konvensional sekaligus meningkatkan efisiensi ekonomi sistem dalam jangka panjang.

Salah satu hasil penting dari penelitian ini adalah kemampuan sistem untuk menjual energi ke jaringan listrik sebesar 315.694 kWh/tahun, lebih besar dibandingkan energi yang dibeli dari jaringan yaitu sebesar 255.092 kWh/tahun. Kondisi tersebut menghasilkan nilai *net energy purchased* sebesar -60.602 kWh/tahun yang menunjukkan bahwa sistem beroperasi sebagai *net exporter*. Artinya, energi yang dihasilkan sistem lebih besar dibandingkan energi yang diserap dari jaringan listrik. Penelitian (Das et al., 2021) menunjukkan bahwa sistem energi hibrida yang mampu menjual energi berlebih ke jaringan listrik cenderung memiliki nilai COE

yang lebih rendah dibandingkan sistem yang hanya mengandalkan konsumsi internal. Oleh karena itu, kemampuan ekspor energi yang dimiliki sistem pada penelitian ini menjadi salah satu faktor yang mendukung peningkatan kelayakan ekonomi sistem secara keseluruhan.

Selain aspek teknis dan biaya operasional, keberhasilan implementasi sistem energi hibrida juga dipengaruhi oleh berbagai parameter ekonomi seperti tarif listrik, tingkat inflasi, tingkat diskonto, insentif pemerintah, dan umur proyek. Penelitian (Come Zebra et al., 2021) menunjukkan bahwa dukungan kebijakan dan insentif pemerintah memiliki peran penting dalam meningkatkan kelayakan investasi energi terbarukan. Sementara itu (Rezaei et al., 2021) melaporkan bahwa perubahan tingkat diskonto dan inflasi dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai NPC dan biaya energi sistem. Oleh karena itu, pengembangan sistem energi hibrida di masa mendatang perlu mempertimbangkan aspek kebijakan dan kondisi ekonomi yang berlaku agar manfaat ekonomi yang diperoleh dapat semakin optimal.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa sistem hibrida PLTS–PLTB–PLTSa terintegrasi jaringan listrik memiliki tingkat kelayakan ekonomi yang baik untuk diterapkan pada lingkungan kampus. Nilai COE sebesar Rp1.122/kWh menunjukkan biaya energi yang kompetitif, sedangkan nilai *renewable fraction* sebesar 75,2% menunjukkan tingginya kontribusi energi terbarukan dalam sistem. Kemampuan sistem menghasilkan surplus energi untuk diekspor ke jaringan listrik, dikombinasikan dengan manfaat ekonomi dari pemanfaatan sampah sebagai sumber energi, menjadikan

sistem yang dirancang tidak hanya layak secara teknis tetapi juga memberikan keuntungan ekonomi dan lingkungan dalam jangka panjang.

Analisis Lingkungan dan Pengurangan Emisi

Pemanfaatan teknologi *waste-to-energy* pada penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian terdahulu yang menunjukkan manfaat lingkungan yang signifikan. (Yazdani et al., 2020) melaporkan bahwa teknologi *waste-to-energy* memiliki tingkat keberlanjutan yang lebih baik dibandingkan pembangkit konvensional berbasis bahan bakar fosil. Selain itu (Luo et al., 2024) menunjukkan bahwa pengolahan satu ton sampah melalui teknologi energi mampu mengurangi emisi gas rumah kaca hingga sekitar 30% dibandingkan metode pembuangan konvensional. (Falsafi et al., 2026) juga menyatakan bahwa teknologi konversi sampah menjadi energi dapat mengurangi emisi berbahaya hingga 94% dibandingkan proses penimbunan sampah di *landfill*. Oleh karena itu, pemanfaatan sampah sebagai bahan bakar PLTSa pada penelitian ini berpotensi memberikan manfaat lingkungan yang lebih luas dibandingkan hanya sebagai sumber energi alternatif.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan (Razmjoo et al., 2021) yang menunjukkan bahwa sistem hibrida berbasis surya, angin, dan biomassa dengan *renewable fraction* di atas 72% mampu mengurangi emisi CO₂ lebih dari 2.000 kg per rumah tangga setiap tahun. (Chowdhury et al., 2020) juga melaporkan bahwa sistem PV-biomassa mampu menurunkan emisi karbon sekitar 3,81 ton per tahun dibandingkan sistem konvensional. Temuan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan pemanfaatan energi terbarukan

memiliki hubungan yang kuat dengan pengurangan emisi gas rumah kaca. Dengan nilai *renewable fraction* sebesar 75,2%, sistem yang dirancang pada penelitian ini menunjukkan potensi yang besar dalam mendukung upaya dekarbonisasi sektor energi dan pengurangan dampak lingkungan.

Kontribusi PLTS sebagai sumber energi utama juga memiliki peran penting dalam menekan emisi karbon. (Tarigan, 2018) melaporkan bahwa penerapan PLTS atap pada lingkungan universitas mampu mengurangi emisi CO₂ hingga 1.195,7 ton per tahun. (Cristea et al., 2022) juga menunjukkan bahwa sistem PLTS berkapasitas 100 kW pada institusi pendidikan mampu menurunkan emisi karbon sekitar 460 ton CO₂ per tahun. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan energi surya pada bangunan pendidikan memiliki potensi besar dalam mendukung dekarbonisasi sektor pendidikan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Selain mengurangi emisi, implementasi sistem hibrida yang terhubung dengan jaringan listrik juga mendukung pengembangan konsep *green campus*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan energi terbarukan dalam jumlah besar serta mengeksplor energi ke jaringan listrik sebesar 315.694 kWh/tahun. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penerapan sistem hibrida tidak hanya memberikan manfaat lingkungan tetapi juga mendukung keberlanjutan operasional institusi pendidikan. Secara keseluruhan, hasil analisis lingkungan menunjukkan bahwa sistem hibrida PLTS–PLTB–PLTSa terintegrasi jaringan listrik memiliki kinerja lingkungan yang baik. Tingginya kontribusi energi terbarukan, pemanfaatan sampah sebagai sumber energi, serta kemampuan sistem dalam

menekan emisi menjadikan konfigurasi yang dirancang sebagai solusi yang mendukung konsep *green campus* dan pembangunan energi berkelanjutan. Implementasi sistem serupa pada lingkungan pendidikan berpotensi memberikan manfaat yang tidak hanya terbatas pada penghematan energi dan biaya operasional, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon, pengelolaan limbah yang lebih efektif, serta peningkatan kualitas lingkungan secara berkelanjutan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh beberapa simpulan sebagai berikut; 1) Sistem hibrida yang dirancang mampu menghasilkan energi listrik sebesar 972.876 kWh/tahun dengan kontribusi energi terbarukan mencapai 717.784 kWh/tahun atau sekitar 73,8% dari total produksi energi. Sistem juga menunjukkan tingkat keandalan yang sangat baik dengan nilai *unmet electric load* dan *capacity shortage* sebesar 0 kWh/tahun, sehingga seluruh kebutuhan energi listrik dapat terpenuhi selama periode simulasi; 2) Dari aspek ekonomi, sistem menghasilkan nilai *Net Present Cost* (NPC) sebesar Rp13,85 miliar dan *Cost of energy* (COE) sebesar Rp1.122/kWh. Selain itu, energi yang dijual ke jaringan listrik sebesar 315.694 kWh/tahun lebih besar dibandingkan energi yang dibeli sebesar 255.092 kWh/tahun, sehingga sistem beroperasi sebagai *net exporter* dan menunjukkan prospek kelayakan ekonomi yang baik untuk diterapkan pada lingkungan kampus; 3) Dari aspek lingkungan, sistem memiliki *renewable fraction* sebesar 75,2% serta mampu memanfaatkan sampah sebesar 88,7 ton/tahun melalui PLTSa untuk menghasilkan energi listrik. Integrasi PLTS, PLTB, dan PLTSa berkontribusi

dalam meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan, mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil, serta mendukung pengurangan emisi dan pengelolaan limbah yang lebih berkelanjutan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem hibrida PLTS–PLTB–PLTSa terintegrasi jaringan listrik layak diterapkan dari aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Sistem ini berpotensi mendukung pengembangan konsep *green campus* serta menjadi alternatif solusi dalam mewujudkan sistem energi yang lebih bersih, efisien, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adipradana, W., Sofijan, A., Wisnutama, K., Ardianto, F., Cekdin, C., & Siregar, B. O. (2025). Evaluasi Efektivitas Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hibrida–Generator Set dengan Menggunakan. *Jurnal Surya Energy*, 9(2), 83–90. <https://doi.org/10.32502/jse.v9i2.526>
- Ajiboye, A. A., Popoola, S. I., Adewuyi, O. B., Atayero, A. A., & Adebisi, B. (2022). Data-driven Optimal Planning for Hybrid Renewable Energy System Management in Smart Campus: A Case Study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52(Part B), 102189. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102189>
- Al-Najjar, H., Pfeifer, C., Al Afif, R., & El-Khozondar, H. J. (2022). Performance Evaluation of A Hybrid Grid-Connected Photovoltaic Biogas-Generator Power System. *Energies*, 15(9), 3151. <https://doi.org/10.3390/en15093151>
- Alvianingsih, G., & Simanjuntak, J. C. H. (2021). Analisis Tekno-Ekonomi Hibrid Sistem PLTD PLTS di Pulau Gersik, Belitung Menggunakan Perangkat Lunak Homer. *SUTET*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.33322/sutet.v11i1.1372>
- Bonifacius, N. (2018). Komparasi Biaya Rutin antara BIPV, Genset, dan PLN Daya Setara 900 VA. *Mintakat: Jurnal Arsitektur*, 19(2), 77–84. <https://doi.org/10.26905/mj.v19i2.3222>
- Chowdhury, N., Akram Hossain, C., Longo, M., & Yaïci, W. (2020). Feasibility and Cost Analysis of Photovoltaic-Biomass Hybrid Energy System in Off-Grid Areas of Bangladesh. In *Sustainability*, 12(4), 1568. <https://doi.org/10.3390/su12041568>
- Come Zebra, E. I., van der Windt, H. J., Nhumai, G., & Faaij, A. P. C. (2021). A Review of Hybrid Renewable Energy Systems in Mini-Grids for Off-Grid Electrification in Developing Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111036. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111036>
- Cristea, C., Cristea, M., Micu, D. D., Ceclan, A., Tîrnovan, R.-A., & Şerban, F. M. (2022). Tridimensional Sustainability and Feasibility Assessment of Grid-Connected Solar Photovoltaic Systems Applied for the Technical University of Cluj-Napoca. in *Sustainability*, 14(17) 10892. <https://doi.org/10.3390/su141710892>
- Das, B. K., Alotaibi, M. A., Das, P.,

- Islam, M. S., Das, S. K., & Hossain, M. A. (2021). Feasibility and techno-economic analysis of Stand-Alone and Grid-Connected Pv/Wind/Diesel/Batt Hybrid Energy System: A Case Study. *Energy Strategy Reviews*, 37, 100673.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100673>
- Falsafi, A., Abdulkareem, M., & Horttanainen, M. (2026). Assessing Dioxin Emissions Change in The Transition from Landfilling of MSW to Waste-To-Energy. *Environmental Science and Pollution Research*, 33(6), 1960–1970.
<https://doi.org/10.1007/s11356-025-37006-x>
- Gabra, S., Miles, J., & Scott, S. A. (2019). Techno-Economic Analysis of Stand-Alone Wind Micro-Grids, Compared with PV and Diesel in Africa. *Renewable Energy*, 143, 1928–1938.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.119>
- Gopi, A., Sudhakar, K., Keng, N. W., Krishnan, A. R., & Priya, S. S. (2021). Performance Modeling of the Weather Impact on a Utility-Scale PV Power Plant in a Tropical Region. *International Journal of Photoenergy*, 2021(1), 5551014.
<https://doi.org/10.1155/2021/5551014>
- Harianto, B., & Karjadi, M. (2025). Kombinasi Panel Surya dan Generator Konvensional untuk Pemenuhan Beban Listrik. *Ranah Research : Journal Of Multidisciplinary Research and Development*, 7(4), 3011–3019.
<https://doi.org/10.38035/rj.v7i4.1578>
- Hong, T., Vuong, Q., Cuong, X., & Do, N. Y. (2023). Long-term Performance of Roof-Top GCPV Systems in Central Viet Nam. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(500), 998–1007.
<https://doi.org/10.14710/ijred.2023.56569>
- Iqbar, I., Muhammad, M., & Gilani, S. I. U. (2022). Feasibility Study of Harnessing Low Wind Speed Turbine as Hybrid Power Source for Offshore Platforms. *10(7)*, 963.
<https://doi.org/10.3390/jmse10070963>
- Jamaludin, J., & Saepuloh, L. (2024). Tren Riset Twin Digital Smart Campus. *Sang Pencerah: Jurnal Ilmiah Universitas Muhammadiyah Buton*, 10(2), 408–425.
<https://doi.org/10.35326/pencerah.v10i2.5317>
- Khosravani, A., Safaei, E., Reynolds, M., Kelly, K. E., & Powell, K. M. (2022). Challenges of Reaching High Renewable Fractions in Hybrid Renewable Energy Systems (Hress). *SSRN Electronic Journal*, 1–33.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4136233>
- Komara, A. N., & Mahardika, M. A. (2026). Optimalisasi Pemanfaatan Energi Terbarukan dalam Infrastruktur Militer TNI AD : Telaah Literatur Sistematis dan Analisis Studi Kasus Hybrid Energy System di Wilayah Terpencil. *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur)*, 11(1), 15–24.
<https://doi.org/10.21070/r.e.m.v11i1.1794>
- Kuznetsova, E., Cardin, M.-A., Diao, M., & Zhang, S. (2019). Integrated Decision-Support

- Methodology for Combined Centralized-Decentralized Waste-to-Energy Management Systems Design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 477–500.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.020>
- Luo, Y., Ye, M., Zhou, Y., Su, R., Huang, S., Wang, H., & Dai, X. (2024). Assessing the Environmental Impact of Municipal Waste on Energy Incineration Technology for Power Generation Using Life Cycle Assessment Methodology. In *Toxics* 12(11) 786.
<https://doi.org/10.3390/toxics12110786>
- Manahara, S., & Putri, S. K. (2023). Tantangan Transisi Energi Terbarukan di Indonesia. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, 1(1), 78–92.
<https://doi.org/10.61511/jimese.v1i1.2023.259>
- Mauliza, P., Yana, S., Susanti, S., Rahmi, R., Ikhbar, S., Maryam, M., & Syamsuddin, N. (2023). Kendala Pemenuhan Suplai dan Permintaan Energi Terbarukan Biomassa Indonesia. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(3), 6473–6478.
<https://doi.org/10.32672/jse.v8i3.6449>
- Noor, F. M., & Rahman, A. F. (2023). Studi Penerapan Integrasi Sumber Energi Baru Terbarukan dengan Smart grid dan Sistem Pengendalian SCADA. *Prosiding 14th Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS)*, 14(1), 526–532.
<https://doi.org/10.35313/irwns.v14i1.5440>
- Nurchaya, K. A., Riawan, D. C., & Ashari, M. (2025). Desain Pola Operasi Sistem Hibrida Sumber Energi Terbarukan pada Living Laboratory REIDI. *Seminar Nasional Teknik Elektro*, 4(1), 330–342.
<https://doi.org/10.46962/snte.25.102>
- Oladigbolu, J. O., Ramli, M. A. M., & Al-Turki, Y. A. (2020). Feasibility Study and Comparative Analysis of Hybrid Renewable Power System for off-Grid Rural Electrification in a Typical Remote Village Located in Nigeria. *IEEE Access*, 8, 171643–171663.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024676>
- Otong, M., Alimuddin, A., & Mas'ud Ibnu. (2017). Optimasi Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Menggunakan Homer Di Pulau Tunda. *Setrum: Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, 6(1), 1–13.
<http://dx.doi.org/10.36055/setrum.v6i1.1850>
- Putri, D., & Koenhardono, E. (2016). Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik Hybrid (Sel Surya dan Diesel Generator) Pada Kapal Tanker. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), 2337–2353.
<https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.19318>
- Razmjoo, A., Gakenia Kaigutha, L., Vaziri Rad, M. A., Marzband, M., Davarpanah, A., & Denai, M. (2021). A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area. *Renewable Energy*, 164, 46–57.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.042>
- Rezaei, M., Dampage, U., Das, B. K.,

- Nasif, O., Borowski, P. F., & Mohamed, M. A. (2021). Investigating the Impact of Economic Uncertainty on Optimal Sizing of Grid-Independent Hybrid Renewable Energy Systems. In *Processes* (Vol. 9, Number 8, p. 1468). <https://doi.org/10.3390/pr9081468>
- Riayatsyah, T. M. I., Geumpana, T. A., Fattah, I. M. R., Rizal, S., & Mahlia, T. M. I. (2022). Techno-Economic Analysis and Optimisation of Campus Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System Using HOMER Grid. In *Sustainability* (Vol. 14, Number 13, p. 7735). <https://doi.org/10.3390/su14137735>
- Sepdian, S. (2020). Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Berbasis Energi Surya dan Energi Angin. *Jurnal Elektronika Listrik Dan Teknologi Informasi Terapan*, 1(1), 23. <https://doi.org/10.37338/e.v1i1.95>
- Sesotyo, P. A., Nur, M., & Suseno, J. E. (2019). Plasma Gasification With Municipal Solid Waste As A Method Of Energy Self Sustained For Better Urban Built Environment: Modeling and Simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 396. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/396/1/012002>
- Singh, S., Chauhan, P., & Singh, N. J. (2021). Feasibility of Grid-connected Solar-wind Hybrid System with Electric Vehicle Charging Station. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(2), 295–306. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000081>
- Sujito, S., Mardika, A. R. D., & Nugroho, Z. S. (2022). Rancang Bangun Otomatisasi Sistem Penerangan pada Gedung. *AUSTENIT*, 14(1), 17–23. <https://doi.org/10.53893/austenit.v14i1.4490>
- Tarigan, E. (2018). Simulation and Feasibility Studies of Rooftop PV System for University Campus Buildings in Surabaya, Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(2), 895–908. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v8i2.7547.g7377>
- Tiwary, A., Spasova, S., & Williams, I. D. (2019). A community-scale hybrid energy system integrating biomass for localised solid waste and renewable energy solution: Evaluations in UK and Bulgaria. *Renewable Energy*, 139, 960–967. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.129>
- Triani, M., Anggoro, D. D., & Yunianto, V. D. (2024). Potensi Dekarbonisasi Pembangkit Listrik Batubara Melalui Cofiring Biomassa Dan Carbon Capture Utilization. *Metana: Media Komunikasi Rekayasa Proses Dan Teknologi Tepat Guna*, 20(1), 57–68. <https://doi.org/10.14710/metana.v20i1.63102>
- Wang, S., Tarroja, B., Schell, L. S., & Samuelsen, S. (2021). Determining cost-optimal approaches for managing excess renewable electricity in decarbonized electricity systems. *Renewable Energy*, 178, 1187–1197. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.093>
- Yazdani, S., Salimipour, E., & Moghaddam, M. S. (2020). A

comparison between a natural gas power plant and a municipal solid waste incineration power plant based on an emergy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123158>