

ANALISIS TEKNO-EKONOMI SISTEM PV/WIND TURBINE DENGAN PENYIMPANAN ENERGI HIBRIDA BATERAI DAN FLYWHEEL DI PULAU DERAWAN, INDONESIA

Ardi Azhar Nampira¹, Vita Lystianingrum Budiharto Putri²

Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia^{1,2}

Corresponding Author : 6047212047@mhs.its.ac.id¹, vita@ee.its.ac.id²

Abstrak

Pembangkit listrik yang ada di Pulau Derawan terdiri dari 5 Diesel Generator (DG), sistem Photovoltaic (PV), dan Baterai *Lead Acid*. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan integrasi teknologi PV dan Wind Turbine ke dalam pembangkit listrik hybrid, serta penyimpanan energi menggunakan Baterai *Li-Ion* (LI) dan *Flywheel* (FW). Optimalisasi dan simulasi dilakukan dengan menggunakan Software HOMER dengan mengumpulkan berbagai data seperti beban per tahun, radiasi matahari dan kecepatan angin di Pulau Derawan. Terdapat 4 skenario yang dianalisa yaitu: 5DG/PV/LI, 5DG/PV/LI/FW, 5DG/PV/LI/ WT dan 5DG/PV/LI/WT/FW. Hasil optimal menunjukkan bahwa hanya diperlukan satu DG dengan konfigurasi DG/PV/LI/WT. Skenario 3 ini menghasilkan *Net Present Cost* (NPC) \$1,78 juta, *Levelized Cost of Energy* (LCOE) \$0,264/kWh, emisi CO 1.838 kg/yr, UHC 35.1 kg/yr, PM 3.47 kg/yr, NOx 69.4. Skenario ini memberikan kontribusi yang lebih rendah terhadap polusi udara dan dampak negatif terhadap lingkungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan *Flywheel* sebagai penyimpan energi memiliki investasi awal dan biaya O&M yang tinggi dibandingkan Baterai *Li-Ion*.

Kata kunci: HOMER, Pembangkit listrik hybrid, PV, Wind turbine, Perencanaan teknis dan ekonomi

Abstract

The existing power plant on Derawan Island consists of 5 Diesel Generators (DG), Photovoltaic (PV) systems, and Lead Acid Batteries. This research aims to optimize the integration of PV and Wind Turbine technology into a hybrid power plant, as well as energy storage using Li-Ion (LI) and Flywheel (FW) Batteries. Optimization and simulation are carried out using HOMER software by collecting various data such as load per year, solar radiation and wind speed on Derawan Island. There are 4 scenarios analyzed, namely: 5DG/PV/LI, 5DG/PV/LI/FW, 5DG/PV/LI/WT and 5DG/PV/LI/WT/FW. The optimal results show that only one DG is required with the DG/PV/LI/WT configuration. Scenario 3 resulted in a Net Present Cost (NPC) of \$1.78 million, Levelized Cost of Energy (LCOE) of \$0.264/kWh, CO emissions of 1,838 kg/yr, UHC of 35.1 kg/yr, PM of 3.47 kg/yr, NOx of 69.4. This scenario provides a lower contribution to air pollution and negative impact on the environment. The analysis shows that the addition of Flywheel as energy storage has high initial investment and O&M cost compared to Li-Ion Battery.

Keywords: HOMER, Hybrid Storage, PV, Wind Turbine, Techno economic

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang paling terkena dampak perubahan iklim dan bencana alam seperti kekeringan, banjir, dan abrasi pantai (Legionosuko et al., 2019). Selaun itu, Indonesia memiliki potensi sumber daya energi terbarukan

History:

Received : 2 Juni 2023

Revised : 10 Juni 2023

Accepted : 23 Juni 2023

Published: 30 Juni 2023

Publisher: LPPM Universitas Darma Agung

Licensed: This work is licensed under

[Attribution-NonCommercial-No](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Derivatives 4.0 International \(CC BY-NC-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



yang signifikan, saat ini negara sangat bergantung pada bahan bakar fosil, dengan sekitar 92% dari total konsumsi energi nasional pada tahun 2013 berasal dari bahan bakar fosil (Budiyono et al., 2021). Namun, pemerintah telah menetapkan target untuk meningkatkan porsi energi terbarukan dalam bauran energi. Hal ini bertujuan untuk mengurangi tingkat konsumsi bahan bakar fosil menjadi 69% pada tahun 2050 dan meningkatkan penggunaan energi terbarukan menjadi 31% pada tahun yang sama (Budiyono et al., 2021).

Ada berbagai jenis sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan di Indonesia. Negara ini memiliki potensi energi air yang tinggi, dengan kapasitas potensial sekitar 94,6 GW (Pambudi et al., 2023). Negara ini juga menghasilkan 146,7 juta ton biomassa pada tahun 2019 (Yana et al., 2022). Pemanfaatan biomassa untuk produksi energi dianggap ideal karena memiliki manfaat seperti emisi belerang yang lebih rendah, netralitas CO₂, dan tersedia dalam bentuk limbah pertanian (Handra et al., 2020).

Dari sisi energi matahari, Indonesia memiliki potensi yang sangat besar yaitu sebesar 207 GWp, namun baru sebagian kecil dari potensi tersebut yaitu sebesar 145,81 MWp yang telah dimanfaatkan. Pemerintah telah menetapkan target untuk membangun pembangkit listrik tenaga surya berkapasitas 6,5 GWh pada tahun 2025 (Ihsan et al., 2021). Tenaga angin merupakan sumber energi terbarukan yang menjanjikan di Indonesia. Negara ini memiliki kapasitas potensial sebesar 60,6 GW untuk energi angin (Pambudi et al., 2023). Analisis potensi tenaga angin di Teluk Samiang, Kotabaru, Kalimantan Selatan menunjukkan kondisi yang menguntungkan untuk pembangkitan energi angin (Aslami et al., 2023).

Pengembangan energi terbarukan di Indonesia bukan tanpa tantangan. Ada dua kendala utama penerapan sumber energi terbarukan yaitu hambatan yuridis dan hambatan sosial (Kalpikajati & Hermawan, 2022). Namun demikian, para peneliti, akademisi, dan pemerintah terus berinovasi dan mengembangkan teknologi energi terbarukan di Indonesia untuk memaksimalkan pemanfaatannya (Afif & Martin, 2022). Penerapan energi terbarukan dalam ekonomi biru, khususnya di bidang kelautan, dapat mengatasi masalah kelangkaan sumber daya fosil dan berkontribusi penurunan emisi CO₂ dan pertumbuhan ekonomi (Puspaningtyas, 2022).

Dari data di atas, pada penelitian ini akan diamati potensi energi baru terbarukan di Pulau Derawan. Pembangkit listrik energi baru terbarukan yang terdapat di Pulau Derawan yang pertama adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) (Arifin, 2015). Pulau Derawan merupakan salah satu kampung pesisir yang memiliki luas wilayah sekitar 43 Ha (Nurmawati & Harahap, 2022). Selain karena dekat garis katulistiwa, Pulau derawan juga memiliki sinar matahari yang cukup terang selama sepanjang tahun. Potensi yang ke dua adalah Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) (Mirza et al., 2019). Karena Pulau Derawan memiliki potensi angin yang cukup kencang, terutama pada musim kemarau. Oleh sebab itu pada penelitian ini akan gabungkan kedua sumber potensi EBT tersebut (Pembangkit Hibrid). Sebuah pembangkit hibrid yang menggabungkan PLTS dan PLB dapat memanfaatkan angin saat musim kemarau dan sinar matahari saat musim hujan (Sunardiyo et al., 2022).

Pembangkit hibrid juga dapat mengurangi dependensi terhadap satu sumber energi tertentu, sehingga dapat mengurangi risiko kegagalan sistem dan yang utama dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dengan mengurangi penggunaan sumber energi fosil (Ja'far, 2013). Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan sebuah desain sistem pembangkit listrik energi terbarukan dengan PV-Wind Turbine dan untuk mengatasi kekurangan energi listrik di Pulau Derawan.

METODE PENELITIAN

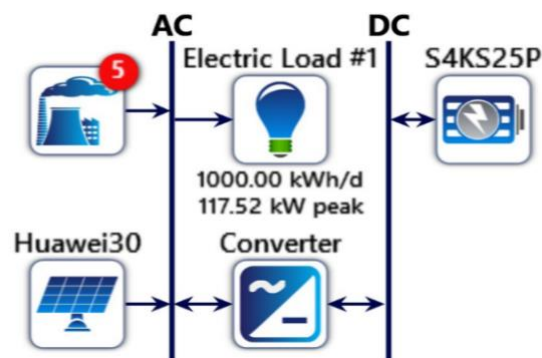
Dalam penelitian ini, skema simulasi yang digunakan melibatkan komponen seperti diesel generator (DG), panel surya (PV), Wind Turbine (WT), baterai lithium-ion (LI) software HOMER Pro dan Flywheel (FW) serta menggunakan dua strategi dispatch, yaitu load following (LF) dan cycle charging (CC). Kebutuhan listrik lainnya, seperti pengisian baterai atau beban yang dapat ditunda (misalnya pompa), dilakukan saat ada kelebihan daya pada sumber energi terbarukan.

HASIL dan PEMBAHASAN

Skenario 1 – 5DG/PV/LI

Dalam skenario ini sama seperti design power suplai yang sudah ada di Pulau Derawan, namun hanya merubah jenis batterainya dari Lead Acid menjadi Li-ion. Alasan menggunakan baterai Li-ion karena memiliki keunggulan kepadatan energi yang lebih tinggi, siklus hidup yang lebih panjang dan berat

Gambar 1 Schematic pembangkit listrik Skenario 1



Pada Skenario 1 memiliki biaya operasional sebesar \$303.656 per tahun. Sistem yang digunakan yaitu panel surya (PV) dengan kapasitas 30 kW, generator dengan kapasitas 100 kW, dan baterai dengan kapasitas 219 kWh. Skenario ini mempunyai biaya operasional yang akan turun menjadi \$120.592 per tahun, hal ini merupakan pengurangan signifikan yang akan memberikan dampak positif pada anggaran perusahaan. Selain itu, dengan mengurangi ketergantungan pada sumber energi eksternal, dapat mencapai keberlanjutan lingkungan yang lebih tinggi dan berkontribusi pada pengurangan emisi karbon.

Hasil dari optimasi sistem yang diusulkan menunjukkan bahwa sistem ini memiliki nilai Net Present Cost (NPC) sebesar \$2,28 juta. NPC merupakan metrik yang menggabungkan biaya investasi awal (CAPEX) dan biaya operasional (OPEX) selama masa pakai sistem. Dalam hal ini, CAPEX sistem ini sebesar \$104.496, yang mencakup biaya pembelian dan pemasangan komponen sistem. Sementara itu, OPEX sistem ini diperkirakan sebesar \$120.592 per tahun, yang mencakup biaya operasi, pemeliharaan, dan pengelolaan sistem sepanjang masa pakainya.

Selain itu, sistem ini memiliki nilai Levelized Cost of Energy (LCOE) sebesar \$0,35 per kWh. LCOE adalah ukuran standar yang digunakan untuk mengevaluasi biaya rata-rata per unit energi yang dihasilkan oleh sistem. Dalam hal ini, nilai LCOE yang relatif rendah menunjukkan bahwa sistem ini dapat menghasilkan energi listrik dengan biaya yang terjangkau. Sistem ini juga memiliki emisi CO₂ sebesar 271,61 kg per tahun dan konsumsi bahan bakar membutuhkan sekitar 103.839 liter per tahun. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan memiliki dampak lingkungan yang relatif kecil dibandingkan dengan sumber energi konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil.

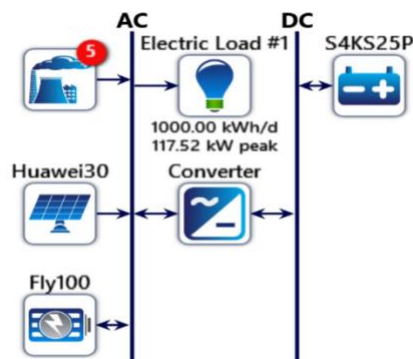
Diesel engine CAT-250kW-PP memiliki modal awal sebesar \$1.521. Setelah dioperasikan, biaya operasionalnya adalah \$18,07 dan tidak ada biaya penggantian yang diperlukan. Namun, di akhir masa pakainya, memiliki nilai sisa sebesar (\$780,58) dengan jumlah total biayanya adalah \$13.475. Sementara untuk type Generik 100kW memiliki modal awal sebesar \$1.521. Biaya operasionalnya sebesar \$6.638, sedangkan biaya penggantian sebesar \$13.089. Nilai sisa DG ini adalah (\$595,60) dengan total biaya mencapai \$2.070.000.

Mikro grid pada Skenario 1 membutuhkan 998 kWh/hari dan memiliki beban puncak 118 kW. Pada grafik dibawah terlihat Diesel Generator type Gen100 paling mendominasi disusul penggunaan PV (Huawei30), sementara CAT-250 hanya digunakan pada bulan Mei yaitu pada saat peak load perbulannya.

Skenario 2 – 5DG/PV/LI/FW

Mikro grid pada skenario ini memiliki system yang sama dengan skenario 1 namun menggunakan tambahan energi peyimpanan yaitu flywheel. Berikut gambar skema desain pembangkit seperti dibawah ini

Gambar 2 Schematic pembangkit listrik Skenario 2



Pada Skenario 2 dibutuhkan biaya operasional energi sebesar \$313.858 per tahun. Hasil optimasi merekomendasikan penambahan sistem panel surya (PV) dengan kapasitas 30 kW, generator dengan kapasitas 100 kW, dan baterai dengan kapasitas 143 kWh. Implementasi sistem PV, generator, baterai Li-Ion dan flywheel ini akan memberikan manfaat yang signifikan. Diperkirakan bahwa biaya operasional akan turun menjadi \$137.407 per tahun. Ini adalah pengurangan yang sangat berarti dan akan memberikan efek positif pada anggaran perusahaan.

Selain manfaat finansial, investasi dalam penambahan ini juga menjanjikan pengembalian yang cepat. Dalam kurun waktu hanya 0,484 tahun setelah implementasi, akan mulai melihat pengembalian investasi tersebut. Dengan kata lain, dalam waktu kurang dari setengah tahun, investasi ini akan mulai menghasilkan keuntungan finansial yang signifikan. Tingkat pengembalian internal (IRR) yang diperkirakan mencapai 206% juga menunjukkan bahwa investasi ini sangat menguntungkan secara finansial.

Hasil optimasi menunjukkan total biaya sistem mikrogrid sepanjang umur proyek 25 tahun. Dalam kasus ini, biaya kini bersih (NPC) adalah sebesar \$2.97 juta. NPC mencakup biaya modal (CAPEX) mencapai \$490.168 dan biaya operasional (OPEX) mencapai \$137.407 per tahun selama masa pakai sistem mikrogrid. Dalam kasus ini, LCOE adalah sebesar 0.451 dollar per kWh. LCOE mencerminkan total biaya sepanjang umur proyek dibagi dengan total energi yang dihasilkan oleh sistem mikrogrid selama periode tersebut. Semakin rendah LCOE, semakin efisien dan terjangkau sistem mikrogrid tersebut. Emisi CO₂ mencapai 289.638 kilogram per tahun. Mengurangi emisi CO₂ adalah tujuan penting dalam sistem mikrogrid yang berkelanjutan, dan angka ini dapat digunakan untuk mengukur dampak lingkungan dari sistem tersebut. Konsumsi bahan bakar mencapai 110.732 liter per tahun. Konsumsi bahan bakar ini berhubungan langsung dengan biaya operasional dan emisi CO₂ sistem mikrogrid. Mengurangi konsumsi bahan bakar dapat mengurangi biaya operasional dan dampak lingkungan sistem.

Diesel Engine type CAT-250kW-PP memiliki biaya modal awal sebesar \$1.521. Sistem ini memerlukan biaya operasional tahunan sebesar \$9,94 untuk menjaga operasionalnya. Tidak ada biaya penggantian yang tercatat dalam data ini, tetapi nilai sisa sistem ini adalah (\$783,53), yang menunjukkan bahwa sistem ini mungkin sudah mencapai akhir masa pakainya. Meskipun demikian, sistem ini masih menghasilkan sumber daya sebesar \$7.204, memberikan kontribusi positif dalam memenuhi kebutuhan energi. Total biaya keseluruhan sistem CAT-250kW-PP adalah \$7.951. sementara itu, Sistem CAT-250kW-PP(1) memiliki biaya modal awal yang sama dengan CAT-250kW-PP, yaitu \$1.521. Namun, tidak ada biaya operasional tahunan yang tercatat untuk sistem ini. Hal ini mungkin menunjukkan bahwa sistem ini tidak lagi beroperasi atau membutuhkan perawatan yang signifikan. Nilai sisa sistem ini adalah (\$767,46), yang menunjukkan bahwa sistem ini mungkin sudah mencapai akhir masa pakainya. Tidak ada sumber daya yang dihasilkan oleh sistem ini, dan total biaya keseluruhan sistem CAT-250kW-PP(1) adalah \$753,54.

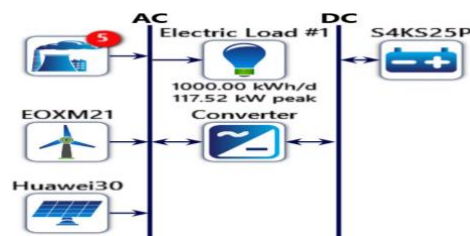
Pada sistem Generic 100kW Fixed Capacity Genset memiliki biaya modal awal yang sama dengan dua sistem sebelumnya, yaitu \$1.521. Sistem ini memerlukan biaya operasional tahunan sebesar \$6.896 untuk menjaga operasionalnya. Biaya penggantian sistem ini tercatat sebesar \$13.245, yang mungkin melibatkan penggantian komponen atau perbaikan yang signifikan. Nilai sisa sistem ini adalah (\$220,40), menunjukkan bahwa sistem ini mungkin sudah mencapai akhir masa pakainya. Namun, sistem ini juga memiliki kontribusi yang signifikan dalam menghasilkan sumber daya, yaitu \$2.190.000. Total biaya keseluruhan sistem Generic 100kW Fixed Capacity Genset adalah \$2,22 juta.

Mikro grid pada Skenario 2 membutuhkan beban 1070 kWh/hari dan memiliki beban puncak 114 kW. Pada grafik dibawah terlihat Diesel Generator type Gen100 paling mendominasi disusul penggunaan PV (Huawei30), sementara CAT-250 hanya digunakan pada bulan Mei yaitu pada saat peak load perbulannya.

Skenario 3 – 5DG/PV/LI/WT

Dalam Skenario 3, menggunakan satu tambahan sumber listrik yaitu Wind Turbine dan hanya memiliki satu energi storage yaitu baterai Li-ion seperti gambar dibawah:

Gambar 3 Schematic pembangkit listrik Skenario 3



Biaya operasional mikrogrid pada Skenario 3 mencapai \$141.242 per tahun dengan mencakup penambahan panel surya dengan kapasitas 30 kW, peningkatan kapasitas baterai menjadi 1.026 kWh, dan penambahan pembangkit angin dengan kapasitas 400 kW. Dengan melakukan peningkatan ini, diyakini bahwa biaya operasional mikrogrid dapat dikurangi menjadi \$72.567 per tahun.

Mengurangi penggunaan energi dari sumber yang berbasis bahan bakar fosil, dapat mengurangi emisi karbon dan memberikan kontribusi yang berarti dalam upaya mitigasi perubahan iklim. Dengan mengimplementasi Skenario 3, akan mampu menjalankan mikrogrid dengan lebih efisien dan berkelanjutan, sambil mengurangi biaya operasional yang signifikan.

Sistem mikrogrid yang telah dirancang pada Skenario 3 memiliki parameter biaya dan kinerja yang signifikan. Berdasarkan hasil optimasi Homer Pro, Net Present Cost (NPC) untuk sistem ini \$1.78 juta. NPC merupakan indikator yang penting untuk mengukur total biaya investasi dan operasional selama masa hidup sistem. Biaya modal awal (CAPEX) untuk mengimplementasikan sistem mikrogrid ini adalah \$435,338. CAPEX mencakup biaya pembelian dan instalasi peralatan serta infrastruktur pendukung lainnya. Sementara itu, biaya operasional (OPEX) untuk

sistem mikrogrid ini mencapai \$72,697 per tahun. OPEX meliputi biaya O&M sistem mikrogrid, termasuk biaya bahan bakar untuk pembangkit angin.

Salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja sistem mikrogrid adalah LCOE. Dalam kasus ini, LCOE adalah \$0.264 per kWh. Dengan mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, sistem mikrogrid ini mampu mengurangi emisi karbon sebesar 127,608 kg per tahun. Hal ini membantu dalam upaya global untuk mengurangi dampak negatif terhadap perubahan iklim. Sementara untuk konsumsi bahan bakar juga dapat ditekan melalui penggunaan sumber energi terbarukan yang lebih efisien. Dalam hal ini, sistem mikrogrid ini mampu mengurangi konsumsi bahan bakar sebanyak 48,788 liter per tahun.

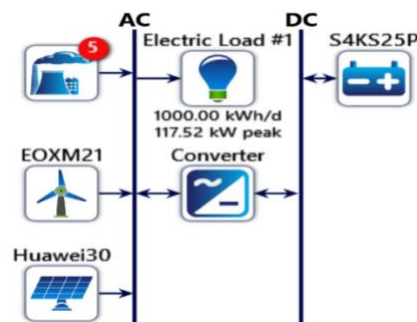
Sistem Eocycle EOX M-21 [100kW] adalah sistem pembangkit listrik dengan biaya modal awal sebesar \$192.000. Sistem ini memerlukan biaya operasional tahunan sebesar \$70.789 untuk menjaga kinerjanya. Sistem Generic 100kW Fixed Capacity Genset memiliki biaya modal awal yang jauh lebih rendah, yaitu \$1.521. Sistem ini memiliki biaya penggantian sebesar \$5.591, yang mungkin mencakup penggantian komponen atau perbaikan yang diperlukan. Nilai sisa sistem ini adalah (\$168,38), menunjukkan kemungkinan bahwa sistem ini juga telah mencapai akhir masa pakainya. Namun, sistem ini memberikan kontribusi signifikan dalam menghasilkan sumber daya sebesar \$989.320. Total biaya keseluruhan sistem ini adalah \$999.469.

Mikro grid pada Skenario 3 ini membutuhkan beban 998 kWh/hari dan memiliki beban puncak 111 kW. Pada grafik dibawah terlihat wind turbine type EOXM21 paling mendominasi disusul penggunaan diesel generator type Gen100, sementara PV (Huawei30) memiliki porsi yang paling sedikit dalam menyuplai kebutuhan beban.

Skenario 4 – 5DG/PV/LI/WT/FW

Mikrogrid hibrida yang diusulkan dalam Skenario 4, menggunakan sumber listrik yang sama pembangkitan seperti Skenario 3, yaitu generator diesel, PV array dan Wind Turbine. Tapi mikro grid ini memiliki dua teknologi penyimpanan energi, yaitu lithium-ion dan flywheel.

Gambar 4 Schematic pembangkit listrik Skenario 4



Pada skenario 4, biaya operasional mencapai \$155.358 per tahun. Namun, untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya operasional melalui penambahan beberapa komponen yang penting dalam sistem energi. Desain system yang diperlukan meliputi penambahan panel surya dengan kapasitas 30 kW, peningkatan

kapasitas baterai menjadi 951 kWh, serta penambahan pembangkit angin dengan kapasitas 400 kW. Dengan melakukan peningkatan ini, biaya operasional akan berkurang secara signifikan menjadi \$88.139 per tahun.

Nilai NPC pada Skenario 4 mencapai \$2.45 juta. Biaya modal awal (CAPEX) yang diperlukan untuk membangun dan mengimplementasikan sistem mikrogrid ini mencapai \$824,023. Selanjutnya, biaya operasional (OPEX) untuk sistem mikrogrid ini diperkirakan sebesar \$88,139 per tahun. LCOE atau biaya listrik terstandarisasi dari sistem mikrogrid ini adalah sekitar \$0.36 per kWh.

Pada Skenario 4 yang memiliki type Wind Turbine, Eocycle EOX M-21 dengan biaya modal awal (Capital) sebesar \$192,000. Turbin ini memiliki biaya operasional (Operating) sebesar \$70,789 per tahun. Selain itu, sistem ini tidak memerlukan penggantian (Replacement) dalam masa pakainya, dan memiliki nilai sisa (Salvage) sebesar (\$17,281) pada akhir masa pakai sistem. Meskipun tidak ada sumber daya tambahan yang tersedia (Resource), total biaya sistem ini mencapai \$245,508.

Generator diesel memiliki daya 100 kW dengan biaya modal awal sebesar \$1,521 dan biaya operasional sebesar \$3,462 per tahun. Selama masa pakainya, sistem ini memerlukan penggantian (Replacement) sebesar \$6,558, dan memiliki nilai sisa (Salvage) sebesar (\$607.82) pada akhir masa pakai sistem. Selain itu, sistem ini memiliki sumber daya tambahan (Resource) berupa \$1,100,000 dengan total biaya sistem ini mencapai \$1.11 juta.

Mikro grid pada Skenario 4 ini membutuhkan beban 998 kWh/hari dan memiliki beban puncak 111 kW. Pada grafik dibawah terlihat wind turbine type EOXM21 paling mendominasi disusul penggunaan diesel generator type Gen100, sementara PV (Huaei30) memiliki porsi yang paling sedikit dalam menyuplai kebutuhan beban.

SIMPULAN

Biaya dan nilai keekonomian: Skenario 4 (5DG/PV/LI/WT/FW), yang menggunakan wind turbine dan flywheel sebagai teknologi penyimpanan energi tambahan, masih belum ekonomis. Karena memiliki biaya modal, operasional, dan perawatan pada flywheel masih tinggi jika dibandingkan dengan teknologi lithium-ion battery. Oleh karena itu, skenario ini tidak dianggap sebagai pilihan yang ekonomis dalam konteks penelitian ini. Skenario Optimum: Skenario 3 (5DG/PV/LI/WT) terbukti menjadi skenario yang paling optimum dari segi ekonomi. Hasil simulasi HOMER Pro menunjukkan bahwa skenario ini memiliki NPC sebesar \$1,780,000 dan LCOE sebesar \$0.264 per kWh, yang merupakan nilai terendah dibandingkan dengan skenario lainnya. Meskipun memiliki Simple Payback 5,8 yr yang lebih lama dari pada skenario 1 dan 2, skenario 3 tetap unggul dibandingkan skenario 4 dengan nilai Return on Investment (ROI) sebesar 11.8% dan Internal Rate of Return (IRR) sebesar 15.8%. Hal ini menunjukkan bahwa investasi yang dilakukan pada skenario 3 memiliki potensi menghasilkan laba yang menguntungkan dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Afif, F., & Martin, A. (2022). Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, Dan Material*, 6(1), 43–52.
- Arifin, Z. (2015). Konsumsi Bbm Untuk Pembangkit Listrik Di Indonesia; Kecenderungan, Permasalahan Dan Solusinya. *M & E*, 13(2), 85–95.
- Aslami, F., Irawan, E. N., Muntaha, M., & Sahal, M. (2023). Analysis of Wind Power Potential in Samiang Bay, Kotabaru, South Kalimantan. *Journal of Renewable Energy and Mechanics*, 6(01).
- Budiyono, B., Riyanta, A. B., Sumardiono, S., Jos, B., & Syaichurrozi, I. (2021). Optimization of parameters for biogas production from bagasse using taguchi method. *Polish Journal of Environmental Studies*.
- Handra, N., Kasim, A., Gunawarman, G., & Santosa, S. (2020). Effect of heating temperature on quality of bio-briquette empty fruit bunch fiber. *Int J Adv Appl Sci*, 9, 192.
- Ihsan, K. T. N., Sakti, A. D., & Wikantika, K. (2021). Geospatial Assessment For Planning A Smart Energy City Using Rooftop Solar Photovoltaic In Bandung City, Indonesia. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.
- Ja'far, M. (2013). *Eneconomics*. Gramedia Pustaka Utama.
- Kalpikajati, S. Y., & Hermawan, S. (2022). Hambatan Penerapan Kebijakan Energi Terbarukan di Indonesia. *Batulis Civil Law Review*, 3(2), 187–207.
- Legionosuko, T., Madjid, M. A., Asmoro, N., & Samudro, E. G. (2019). Posisi dan strategi indonesia dalam menghadapi perubahan iklim guna mendukung ketahanan nasional. *Jurnal Ketahanan Nasional*, 25(3), 295–312.
- Mirza, M., Lubis, R. S., & Gapy, M. (2019). Pemanfaatan alternator sebagai pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB). *Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, Dan Elektro*, 4(4).
- Nurmawati, N., & Harahap, R. G. (2022). Strategi Pengembangan Rencana Kawasan Pesisir Terpadu Pulau Derawan Pasca Pandemi Covid 19. *Jurnal Inovtek Polbeng*, 12(1), 40–45.
- Pambudi, N. A., Firdaus, R. A., Rizkiana, R., Ulfa, D. K., Salsabila, M. S., Suharno, & Sukatiman. (2023). Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development. *Sustainability*, 15(3), 2342.
- Puspaningtyas, M. (2022). *The Impact Of Implementing Blue Energy On Economic Growth In Indonesia*. *AEBD*, 1(4), 54-59. <https://doi.org/10.54204/aebd/vol4no1july2022009>.
- Sunardiyo, S., Suryanto, A., Primadiyono, Y., Sarwono, E., & Asriningati, A. (2022). Pemodelan Sistem Pembangkit Hybrid Diesel Generator-Pv Microgrid Interaktif (Kajian Smart Hybrid). *Inovasi Kimia*, 1, 65–87.
- Yana, S., Nelly, N., Radhiana, R., Ibrahim, N., Zubir, A. A., Zulfikar, T. M., & Yulisma, A. (2022). Dampak Ekspansi Biomassa sebagai Energi Terbarukan: Kasus Energi Terbarukan Indonesia. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(4).