

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Berikut ini adalah rangkuman singkat mengenai penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian “Analisis Tekno-Ekonomi dan Optimasi Sistem Hybrid PLTD, PLTS dan BESS Untuk Keandalan Penyediaan Listrik di Daerah Terpencil: Studi Kasus Desa Kasonaweja, Papua” antara lain:

1. *Techno-Economic Analysis of a Solar PV/Diesel/Battery Hybrid System for a Remote Village in East Kalimantan* (A. N. Afif et al., 2023)

Metode: Penelitian ini mensimulasikan 25 skenario konfigurasi sistem hybrid menggunakan software HOMER Pro dengan variasi kapasitas PV (50-300 kW) dan baterai (100-800 kWh). Data input yang digunakan meliputi data irradiansi harian dengan rata-rata 4.8 kWh/m²/hari, profil beban desa dengan puncak 120 kW, serta data harga komponen tahun 2022. Simulasi dilakukan dengan strategi kontrol *Load Following* dan analisis sensitivitas terhadap harga solar.

Hasil: Konfigurasi optimal yang dihasilkan terdiri dari PV 200 kW, generator diesel 150 kW, dan baterai 400 kWh. Sistem ini mampu menurunkan LCOE dari Rp 2.850/kWh (sistem diesel murni) menjadi Rp 1.653/kWh, serta mengurangi konsumsi solar dari 146.000 liter/tahun menjadi 48.500 liter/tahun. Emisi CO₂ turun dari 386 ton/tahun menjadi 128 ton/tahun, membuktikan kelayakan teknis dan ekonomi sistem *hybrid* di lokasi terpencil Indonesia.

2. *Feasibility Study of Hybrid Solar-Diesel Power System for a Remote Island in Maluku, Indonesia* (B. D. H. Pratama et al., 2022)

Metode: Penelitian menggunakan HOMER Energy untuk memodelkan tiga skenario: sistem diesel *existing*, sistem hybrid tanpa baterai, dan sistem hybrid dengan baterai. Data teknis yang digunakan meliputi profil beban pulau dengan puncak 85 kW, data irradiansi 5.2 kWh/m²/hari, dan karakteristik generator diesel 100 kW *existing*. Analisis ekonomi menggunakan discount rate 8% dengan umur proyek 20 tahun.

Hasil: Sistem *hybrid* dengan konfigurasi PV 120 kW dan baterai 200 kWh terbukti paling optimal, berhasil mengurangi jam operasi generator dari 24 jam/hari menjadi 9 jam/hari. Konsumsi bahan bakar turun dari 98.000 liter/tahun menjadi 42.000 liter/tahun, sementara LCOE sistem turun 34% dari Rp 3.215/kWh menjadi Rp 2.121/kWh. Keandalan sistem meningkat dengan kapasitas baterai yang mampu menyuplai beban puncak selama 4 jam tanpa generator.

3. *Techno-Economic Analysis of Battery Energy Storage Systems in Hybrid Diesel-Solar Microgrids* (M. M. M. L. B. Lakruwan et al., 2024)

Metode: Penelitian melakukan simulasi dinamis menggunakan MATLAB/Simulink dikombinasikan dengan HOMER Pro untuk menganalisis respons frekuensi sistem. Parameter yang dianalisis meliputi *State of Charge* (SoC) baterai, *ramp rate* generator, dan frekuensi sistem *under varying load conditions*. Data teknis menggunakan baterai lithium-ion dengan efisiensi 95% dan degradasi kapasitas 2% per tahun.

Hasil: Implementasi BESS berkapasitas 500 kWh terbukti mampu mengurangi fluktuasi frekuensi sistem dari ± 1.5 Hz menjadi ± 0.3 Hz. *Start-stop* generator berkurang dari 8 kali/hari menjadi 2 kali/hari, memperpanjang umur generator dan mengurangi biaya *maintenance* sebesar 28%. Meskipun biaya kapital BESS tinggi, *payback period* tercapai dalam 6.2 tahun melalui penghematan operasional yang signifikan.

4. *Optimal Sizing of Renewable Energy Storage: A Techno-Economic Analysis for Hybrid Power Systems in Off-Grid Locations* (K. Singh dan R. Patel, 2023)

Metode: Penelitian mengembangkan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang terintegrasi dengan HOMER API untuk optimasi kapasitas penyimpanan energi. Algoritma mempertimbangkan *constraints* termasuk *Depth of Discharge* (DoD) baterai 80%, *lifetime* proyek 25 tahun, dan *reliability index* 99.5%. Data input menggunakan profil beban musiman dan data cuaca historis 10 tahun.

Hasil: Algoritma PSO berhasil mengoptimasi kapasitas baterai pada 450 kWh dengan konfigurasi PV 180 kW, menghasilkan pengurangan biaya sistem 25% dibandingkan metode konvensional. *Reliability* sistem mencapai 99.7% dengan *Loss of Power Supply Probability* (LPSP) hanya 0.3%. Metode ini terbukti efektif

untuk menentukan ukuran sistem yang optimal dengan mempertimbangkan variabilitas sumber energi terbarukan.

5. *Economic and Environmental Benefits of Hybrid Renewable Energy Systems in Indonesian Rural Electrification* (S. Wijaya dan D. A. Prasetyo, 2023)

Metode: Penelitian melakukan analisis komparatif terhadap 5 proyek percontohan sistem *hybrid* di pedesaan Indonesia menggunakan data *monitoring* 3 tahun. Metode analisis mencakup *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk emisi karbon, *Net Present Value* (NPV) untuk kelayakan ekonomi, dan *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) untuk evaluasi kinerja keseluruhan.

Hasil: Rata-rata penurunan BPP sebesar 42% tercapai pada semua lokasi studi, dengan kisaran 30-50% tergantung kondisi lokal. Emisi karbon turun signifikan dari rata-rata 0.85 kg CO₂/kWh menjadi 0.21 kg CO₂/kWh. Faktor keberhasilan kunci meliputi keterlibatan masyarakat lokal, pelatihan operator, dan dukungan kebijakan pemerintah berupa insentif fiskal. Studi ini merekomendasikan pendekatan adaptif dalam perencanaan sistem *hybrid* berdasarkan karakteristik spesifik lokasi.

Berdasarkan tinjauan terhadap kelima penelitian terdahulu, sistem *hybrid* PLTD, PLTS dan Baterai telah terbukti layak secara teknis dan ekonomi di berbagai lokasi terpencil Indonesia. Namun, penelitian spesifik untuk Desa Kasonaweja, Papua dengan karakteristik ketidakstabilan pasokan listrik akibat ketergantungan pada BBM dan BPP yang sangat tinggi (Rp 5.581/kWh) belum banyak dilakukan. Penelitian ini mengisi celah tersebut melalui analisis konfigurasi optimal yang mempertimbangkan karakteristik unik lokasi, serta menyajikan rekomendasi implementasi terukur bagi pemangku kepentingan dengan target utama peningkatan keandalan pasokan listrik 24 jam dan penurunan BPP yang signifikan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

A. Konsep Dasar dan Prinsip Kerja Fotovoltaik

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan teknologi konversi energi yang mengubah radiasi matahari langsung menjadi energi listrik melalui

fenomena fisika yang dikenal sebagai efek fotovoltaiik. Proses fundamental ini pertama kali ditemukan oleh Alexandre Edmond Becquerel pada tahun 1839, namun aplikasi praktisnya baru berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir seiring dengan kemajuan teknologi material semikonduktor. Menurut Dewi (2021), efek fotovoltaiik terjadi ketika foton cahaya dengan energi tertentu menumbuk material semikonduktor seperti silikon, menyebabkan elektron terlepas dari ikatan atomnya dan menghasilkan pasangan *electron hole*. Medan listrik internal yang terbentuk pada sambungan p-n kemudian memisahkan pembawa muatan ini secara efisien, mengarahkan elektron ke kontak negatif dan *hole* ke kontak positif, sehingga menciptakan arus listrik searah (DC) yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan.



Gambar 2-1 Ilustrasi PLTS dan BESS

Proses konversi energi dalam sistem PLTS modern mengikuti serangkaian tahapan yang kompleks dan saling terkait. Tahap pertama adalah absorpsi foton, dimana foton cahaya matahari dengan energi lebih besar dari *bandgap* material semikonduktor diserap secara optimal oleh sel surya. Tahap kedua melibatkan generasi pasangan *electron-hole*, dimana energi foton yang diserap menyebabkan elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi, meninggalkan *hole* di posisi semula. Pada tahap ketiga, pemisahan muatan terjadi akibat medan listrik internal yang terbentuk di sambungan p-n, yang secara efektif memisahkan

elektron dan *hole* menuju kontak yang berlawanan. Tahap akhir adalah koleksi arus, dimana elektron mengalir melalui sirkuit eksternal menghasilkan kerja listrik yang dapat dimanfaatkan, sementara *hole* bergerak menuju kontak positif menyelesaikan siklus konduksi. Keseluruhan proses ini berlangsung secara kontinu selama sel surya terekspos oleh cahaya matahari, dengan efisiensi konversi yang dipengaruhi oleh berbagai faktor fisika material dan kondisi lingkungan.

B. Komponen Utama dan Konfigurasi Sistem PLTS

Sistem PLTS secara umum terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara sinergis untuk menjamin kinerja optimal. Modul Surya berfungsi sebagai jantung sistem, terdiri dari 36 hingga 72 sel surya individual yang terhubung secara seri dan paralel untuk mencapai tegangan dan arus yang diinginkan. Menurut Green *et al.* (2020), modul surya komersial saat ini mencapai efisiensi antara 15-22%, dengan teknologi terbaru seperti PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*) dan HJT (*Heterojunction Technology*) mampu mencapai efisiensi di atas 24% dalam kondisi laboratorium. *Inverter* memegang peran krusial dalam mengkonversi arus searah (DC) dari modul surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang kompatibel dengan peralatan listrik standar. Inverter modern mencapai efisiensi konversi 95-98% dan tersedia dalam berbagai konfigurasi termasuk *string inverter* untuk sistem skala menengah, *micro-inverter* untuk optimasi individual modul, dan *central inverter* untuk aplikasi skala *utility*.

Charge Controller berfungsi sebagai pengatur aliran daya yang cerdas, dengan teknologi MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) mampu meningkatkan efisiensi sistem sebesar 20-30% dibandingkan dengan teknologi PWM konvensional. Komponen ini secara kontinu memantau titik daya maksimum dari modul surya dan menyesuaikan impedansi beban untuk memastikan ekstraksi energi yang optimal *under varying weather conditions*. *Battery Storage* berperan sebagai reservoir energi, menyimpan kelebihan produksi pada siang hari untuk digunakan pada malam hari atau kondisi mendung. Sistem penyimpanan modern mencapai efisiensi *round-trip* 80-90% untuk teknologi lithium-ion, dengan

kemampuan *depth of discharge* (DoD) mencapai 80-90% yang secara signifikan meningkatkan utilisasi kapasitas terpasang. Selain komponen utama tersebut, sistem PLTS juga dilengkapi dengan *balance of system* (BOS) yang mencakup struktur *mounting*, sistem kabel, proteksi listrik, dan *monitoring system* yang bersama-sama menjamin keandalan dan keselamatan operasional jangka panjang.

C. Faktor-faktor Kritis yang Mempengaruhi Kinerja PLTS

Kinerja sistem PLTS dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis dan lingkungan yang saling berinteraksi secara kompleks. Intensitas Radiasi merupakan faktor penentu utama, di mana daya keluaran berbanding lurus dengan intensitas radiasi yang diterima - pada kondisi iradiasi 500 W/m^2 , sistem biasanya menghasilkan 50% dari keluaran maksimumnya. Temperatur Operasi memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi konversi; menurut penelitian Skoplaki & Palyvos (2009), setiap kenaikan suhu 1°C di atas 25°C mengurangi efisiensi modul surya sebesar 0,3-0,5% akibat peningkatan laju rekombinasi dan penurunan tegangan. Spektrum Cahaya juga berperan penting, dengan performa optimal dicapai di bawah spektrum standar AM 1.5 dengan total iradiasi 1000 W/m^2 .

Faktor Bayangan dan Pengotoran dapat menyebabkan penurunan performa yang tidak proporsional. Berdasarkan studi Masters (2013), bayangan yang hanya menutupi 10% permukaan modul dapat mengurangi keluaran total hingga 50% akibat efek titik panas dan kehilangan akibat ketidakcocokan. Sudut insidensi mempengaruhi jumlah energi yang dapat diserap, dengan panen energi optimal terjadi ketika sinar matahari jatuh tegak lurus terhadap permukaan modul. Degradasi material merupakan fenomena jangka panjang yang perlu dipertimbangkan, di mana modul surya biasanya mengalami penurunan kapasitas sebesar 0,5-1% per tahun tergantung pada kualitas material dan kondisi lingkungan operasi. Pemahaman komprehensif terhadap berbagai faktor ini sangat penting untuk melakukan prediksi hasil energi yang akurat dan desain sistem yang optimal, terutama dalam konteks lokasi spesifik dengan karakteristik klimatologi yang unik seperti di wilayah Papua.

2.2.2 Battery Energy Storage System (BESS)

A. Peran Strategis BESS dalam Sistem Energi Modern

Battery Energy Storage System (BESS) merepresentasikan teknologi kritis dalam transformasi sistem energi menuju keberlanjutan, berfungsi sebagai peluang untuk integrasi masif energi terbarukan yang bersifat *intermiten*. Dalam konteks sistem *hybrid*, BESS memainkan multi-peran strategis yang mencakup pergeseran waktu energi dengan menyimpan energi berlebih pada periode produksi tinggi untuk digunakan pada periode permintaan puncak, regulasi frekuensi melalui respons cepat dalam hitungan milidetik untuk menstabilkan frekuensi sistem, pengurangan fluktuasi dengan mengurangi gejolak keluaran pembangkit *intermiten*, serta kemampuan start darurat yang memungkinkan start ulang sistem setelah pemadaman total tanpa bergantung pada sumber eksternal. Kemampuan BESS dalam memberikan respons inersia sintetis dan dukungan tegangan menjadikannya komponen penting dalam menjaga stabilitas dan keandalan sistem kelistrikan modern dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi.

B. Evolusi Teknologi Baterai dan Karakteristik Kinerja

Lanskap teknologi baterai untuk aplikasi BESS telah mengalami evolusi signifikan dalam dekade terakhir, dengan berbagai kimia menawarkan pertukaran yang berbeda antara kepadatan energi, masa pakai, keselamatan, dan biaya. Teknologi Lithium-ion mendominasi pasar terkini dengan kepadatan energi 150-250 Wh/kg, siklus hidup 3000-5000 siklus hingga retensi kapasitas 80%, dan efisiensi bolak-balik 90-95%. Sub-teknologi dalam *lithium-ion* termasuk NMC (*Nickel Manganese Cobalt*) dengan kepadatan energi tinggi namun masalah keselamatan tertentu, dan LFP (*Lithium Iron Phosphate*) dengan keselamatan superior namun kepadatan energi lebih rendah. Teknologi *Lead-acid*, meskipun lebih matang dengan biaya modal rendah, memiliki keterbatasan signifikan berupa kepadatan energi hanya 30-50 Wh/kg, siklus hidup terbatas 500-1000 siklus, dan efisiensi bolak-balik 70-85% yang membuatnya kurang kompetitif untuk aplikasi pengisian ulang yang sering.

Flow Battery menawarkan alternatif menarik untuk penyimpanan jangka panjang dengan siklus hidup melebihi 10.000 siklus dan kemampuan pengosongan dalam

tanpa degradasi signifikan, meskipun dengan pertukaran kepadatan energi rendah 15-25 Wh/kg dan efisiensi 70-80%. Teknologi *emerging* seperti *Solid-state Battery* menjanjikan peningkatan revolusioner dalam keselamatan dan kepadatan energi, sementara teknologi *Sodium-ion* menawarkan jalur untuk mengurangi ketergantungan pada material lithium yang kritis. Pemilihan teknologi optimal sangat bergantung pada persyaratan spesifik aplikasi termasuk durasi pengosongan yang diperlukan, frekuensi pengisian ulang, kendala ruang, dan ketersediaan anggaran modal.

C. Parameter Teknis Kritis dan Metode Penilaian

Penilaian kinerja BESS melibatkan evaluasi komprehensif terhadap beberapa parameter kritis yang saling terkait. *Depth of Discharge* (DoD) menentukan pemanfaatan praktis kapasitas terpasang, dengan teknologi lithium-ion biasanya beroperasi pada 80-90% DoD sementara *lead-acid* terbatas hingga 50-60% untuk menjaga masa pakai. Siklus Hidup didefinisikan sebagai jumlah siklus pengisian/pengosongan lengkap hingga kapasitas turun ke 80% dari nilai awal, dengan faktor penentu utama termasuk suhu operasi, laju pengisian/pengosongan, dan DoD operasional. C-rate menghitung laju pengisian/pengosongan relatif terhadap kapasitas nominal, di mana 1C setara dengan pengosongan kapasitas penuh dalam 1 jam, dan 0,5C dalam 2 jam.

Tingkat Degradasi merepresentasikan penurunan kapasitas tahunan yang tidak dapat balik, dengan teknologi lithium-ion biasanya mengalami degradasi 2-3% per tahun dalam kondisi operasi normal. Efisiensi bolak-balik mengukur rasio energi yang dapat dikeluarkan terhadap energi yang dimasukkan, dengan nilai tipikal 90-95% untuk lithium-ion namun dapat bervariasi secara signifikan dengan kondisi operasi. Masa pakai dari pola pengisian ulang, biasanya 10-15 tahun untuk teknologi modern. Penilaian Kinerja memerlukan analisis terintegrasi menggunakan metode pengujian dipercepat, pemodelan empiris, dan data operasional dunia nyata untuk prediksi masa pakai yang akurat dan evaluasi ekonomi. Pemahaman mendalam terhadap parameter-parameter ini sangat

penting untuk penentuan ukuran optimal, pengembangan strategi operasional, dan pemodelan keuangan yang akurat dalam konteks integrasi sistem *hybrid*.

2.2.3 Sistem *Hybrid* PLTD, PLTS dan BESS

A. Filosofi Integrasi Sistem *Hybrid* dan Paradigma Operasional

Sistem *hybrid* PLTD, PLTS dan BESS merepresentasikan paradigma baru dalam penyediaan energi di daerah terpencil yang mengintegrasikan berbagai sumber energi dengan karakteristik saling melengkapi untuk mencapai optimasi biaya, keandalan, dan keberlanjutan. Filosofi dasar integrasi ini terletak pada kemampuan sistem untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing teknologi sementara secara simultan memitigasi kelemahannya. PLTS berperan sebagai sumber energi primer dengan biaya operasi mendekati nol namun dengan karakteristik *intermiten* yang tinggi, sementara PLTD berfungsi sebagai cadangan yang dapat diatur dengan keandalan tinggi namun biaya operasi yang signifikan, dan BESS bertindak sebagai penyangga energi yang menjembatani ketidaksesuaian temporal antara pasokan dan permintaan. Menurut penelitian Liang (2017), sistem *hybrid* yang terintegrasi dengan baik mampu mencapai penetrasi energi terbarukan 50-80% sementara secara simultan mempertahankan keandalan sistem di atas 99%, suatu pencapaian yang tidak mungkin diraih oleh masing-masing teknologi secara mandiri.

B. Konfigurasi Teknis dan Arsitektur Sistem

Dalam praktik rekayasa, sistem *hybrid* dapat diimplementasikan dalam beberapa konfigurasi arsitektural dengan karakteristik yang berbeda-beda. Konfigurasi *DC-Coupled* menempatkan semua sumber energi pada bus DC bersama sebelum dikonversi ke AC melalui *inverter* terpusat, menghasilkan efisiensi sistem keseluruhan 95-97% akibat kehilangan konversi minimal. Konfigurasi ini sangat sesuai untuk proyek energi hijau baru di mana seluruh komponen dapat didesain secara terintegrasi dari awal. Konfigurasi *AC-Coupled* menghubungkan masing-masing sumber energi melalui *inverter* khusus yang terhubung ke bus AC, menawarkan fleksibilitas tinggi untuk *retrofitting* sistem *existing* dan ekspansi modular, meskipun dengan efisiensi yang sedikit lebih rendah 92-95% akibat

beberapa tahapan konversi. Konfigurasi *Hybrid-Coupled* mengkombinasikan kedua pendekatan untuk mencapai optimasi biaya dan performa, misalnya dengan menghubungkan PLTS melalui bus DC sementara PLTD *existing* dipertahankan pada koneksi AC.

Dari perspektif arsitektur kontrol, sistem *hybrid* modern biasanya mengadopsi struktur kontrol hierarkis yang terdiri dari kontrol primer untuk respons cepat stabilisasi tegangan dan frekuensi, kontrol sekunder untuk optimasi pembagian daya, dan kontrol tersier untuk *dispatch* ekonomi jangka menengah-panjang. Implementasi infrastruktur komunikasi seperti sistem SCADA memungkinkan pemantauan *real-time* dan kontrol terkoordinasi seluruh komponen, sementara alat peramalan berdasarkan data meteorologi dan analisis pola beban memfasilitasi operasi prediktif untuk memaksimalkan manfaat ekonomi. Desain sistem proteksi harus mempertimbangkan karakteristik unik sistem *hybrid* termasuk aliran daya dua arah, kontribusi multiple sumber terhadap arus gangguan, dan persyaratan deteksi pemisah untuk menjamin keselamatan personel dan integritas peralatan.

C. Strategi Operasi dan Algoritma *Dispatch*

Kunci kesuksesan sistem *hybrid* terletak pada strategi operasi optimal yang menentukan kapan dan bagaimana masing-masing sumber energi dikirimkan untuk memenuhi beban. Strategi *Load Following* menempatkan PLTD sebagai pembangkit yang mengikuti variasi beban sementara PLTS beroperasi sebagai sumber prioritas, strategi ini sesuai untuk sistem dengan biaya bahan bakar tinggi namun memerlukan start-stop PLTD yang dapat mempercepat degradasi. Strategi *Cycle Charging* mengoperasikan PLTD pada kapasitas penuh ketika dihidupkan, dengan kelebihan energi digunakan untuk pengisian BESS, pendekatan ini optimal untuk skenario dengan penetrasi energi terbarukan sedang namun memerlukan BESS dengan kapasitas memadai. Strategi *Predictive Dispatch* memanfaatkan teknik peramalan canggih untuk memprediksi generasi surya dan permintaan beban, memungkinkan keputusan *pre-dispatch* optimal yang meminimalkan total biaya operasional.

Menurut Sharma & Goel (2017), implementasi *model predictive control* (MPC) dalam sistem *hybrid* dapat mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 25% dibandingkan strategi konvensional melalui pemanfaatan informasi ramalan yang optimal. Algoritma *economic dispatch* biasanya memformulasikan masalah optimasi dengan fungsi objektif meminimalkan total biaya operasional termasuk biaya bahan bakar, biaya pemeliharaan, dan biaya degradasi, dengan kendala teknis seperti keseimbangan daya, batas kapasitas, dan batasan laju kenaikan daya. Untuk sistem dengan penetrasi energi terbarukan tinggi dan pendekatan berbasis kecerdasan buatan telah terbukti meningkatkan ketahanan sistem dalam menangani ketidakpastian. Pemilihan strategi optimal sangat bergantung pada karakteristik spesifik sistem termasuk ketersediaan sumber daya terbarukan, pola profil beban, struktur harga bahan bakar, dan spesifikasi teknis komponen.

2.2.4 Analisis Tekno-Ekonomi dan Kelayakan Finansial

Analisis tekno-ekonomi merupakan tahap kritis dalam evaluasi proyek pembangkit listrik untuk memastikan bahwa solusi teknis yang diusulkan juga layak secara ekonomi dan finansial. Pada penelitian ini, analisis dilakukan dengan menggunakan dua set metrik utama: *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) sebagai tolok ukur ekonomi per unit energi, dan Indikator Kelayakan Investasi Finansial seperti *Net Present Value* (NPV), *Benefit-Cost Ratio* (BCR), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PBP) untuk menilai daya tarik dan risiko investasi dari perspektif pemodal.

A. Konsep Fundamental dan Metodologi Perhitungan LCOE

Levelized Cost of Electricity (LCOE) merupakan metrik ekonomi fundamental dalam evaluasi proyek pembangkit listrik yang merepresentasikan biaya rata-rata per unit energi yang dihasilkan selama seluruh masa hidup proyek, dengan memperhitungkan *time value of money* melalui analisis *discounted cash flow*. Konsep ini memungkinkan perbandingan yang setara antara berbagai teknologi pembangkit dengan karakteristik operasional dan pola biaya yang

berbeda-beda. LCOE memberikan kerangka analitis komprehensif yang mengintegrasikan seluruh biaya selama siklus hidup proyek termasuk *capital expenditure*, *operational expenditure*, biaya bahan bakar, dan biaya perawatan, kemudian mendistribusikannya secara merata terhadap total energi yang dihasilkan. Pendekatan ini sangat berharga untuk sistem *hybrid* yang melibatkan *high upfront capital cost* untuk komponen *renewable* dan penyimpanan sementara secara simultan menanggung biaya bahan bakar yang signifikan untuk komponen konvensional.

Formula fundamental LCOE mengikuti prinsip *discounted cash flow* dimana *numerator* merepresentasikan *present value* seluruh biaya selama masa hidup proyek sementara *denominator* merepresentasikan *present value* seluruh energi yang dihasilkan. Ekspansi matematis dari formula ini mengungkapkan kompleksitas perhitungan yang mendasarinya: $LCOE = [\sum (It + Mt + Ft + Rt) / (1+r)^t] / [\sum (Et / (1+r)^t)]$, di mana It = *capital expenditure* tahun ke- t , Mt = biaya operasi dan pemeliharaan, Ft = biaya bahan bakar, Rt = biaya penggantian komponen, Et = energi yang dihasilkan, r = *discount rate*, dan n = masa hidup proyek. Untuk sistem *hybrid*, perhitungan menjadi semakin kompleks karena perlu mengalokasikan biaya dan manfaat secara tepat kepada masing-masing komponen, serta mempertimbangkan ketergantungan dan efek sinergis antara berbagai teknologi.

B. Indikator Kelayakan Investasi Finansial

Selain LCOE, kelayakan investasi dari sebuah proyek energi dinilai melalui serangkaian indikator finansial yang mengukur profitabilitas, efisiensi modal, dan profil risiko investasi. Indikator-indikator ini sangat penting bagi investor, lembaga pembiayaan, dan pembuat kebijakan dalam mengambil keputusan alokasi dana.

1. *Net Present Value* (NPV) mengukur selisih antara *present value* arus kas masuk (*benefits*) dan *present value* arus kas keluar (*costs*) selama umur proyek, dengan menggunakan *discount rate* tertentu. NPV positif menunjukkan bahwa proyek diharapkan menghasilkan nilai melebihi biaya modalnya dan layak dilaksanakan. Formula umum NPV adalah:

$NPV = \sum [CF_t / (1+r)^t]$, di mana CF_t adalah arus kas bersih (pemasukan - pengeluaran) pada periode t . Dalam konteks sistem *hybrid*, arus kas masuk utama berasal dari penghematan biaya bahan bakar PLTD (*fuel cost savings*) dan penghindaran biaya pembangkitan dari PLTD eksisting (*avoided cost*).

2. *Benefit-Cost Ratio* (BCR) adalah rasio antara *present value* manfaat (B) terhadap *present value* biaya (C). Rasio yang lebih besar dari 1,0 menunjukkan bahwa manfaat proyek melebihi biayanya. BCR sangat berguna untuk membandingkan beberapa alternatif proyek dengan skala investasi yang berbeda. Formula BCR Adalah $BCR = PV(\text{Benefits}) / PV(\text{Costs})$.
3. *Internal Rate of Return* (IRR) adalah *discount rate* yang membuat NPV suatu proyek sama dengan nol. Dengan kata lain, IRR merepresentasikan tingkat pengembalian efektif (*effective rate of return*) dari investasi tersebut. Suatu proyek dianggap layak jika IRR-nya lebih tinggi dari *Minimum Acceptable Rate of Return* (MARR) atau *hurdle rate*, yang biasanya merefleksikan biaya modal (*cost of capital*) dan premi risiko. IRR dihitung dengan menyelesaikan persamaan $0 = \sum [CF_t / (1+IRR)^t]$.
4. *Discounted Payback Period* menunjukkan lama waktu yang diperlukan agar arus kas kumulatif dari suatu investasi dapat menutup kembali modal awal yang dikeluarkan. *Discounted Payback Period* adalah versi yang lebih akurat karena memperhitungkan *time value of money* dengan mendiskonto arus kas. Periode pengembalian yang lebih singkat umumnya dianggap lebih menarik karena mengurangi risiko eksposur modal dan ketidakpastian jangka panjang.

C. Komponen Biaya, Manfaat, dan Asumsi Proyeksi

Analisis LCOE dan indikator finansial yang komprehensif memerlukan identifikasi dan kuantifikasi seluruh komponen biaya dan manfaat yang relevan sepanjang siklus hidup proyek.

- *Capital Costs* (CAPEX): Mencakup seluruh investasi awal untuk membangun sistem termasuk pengadaan peralatan (modul surya, BESS, inverter), pekerjaan sipil, instalasi, dan *soft costs*. Untuk sistem *hybrid*, CAPEX biasanya didominasi oleh PLTS (USD 400-800/kW) dan BESS (USD 150-300/kWh).

- *Operational Costs* (OPEX): Meliputi pemeliharaan rutin, asuransi, dan biaya administrasi. OPEX tahunan untuk PLTS sekitar 1-2% dari CAPEX, sementara untuk PLTD 4-6% termasuk *overhaul* berkala.
- Biaya Bahan Bakar: Komponen signifikan untuk PLTD, dengan sensitivitas tinggi terhadap volatilitas harga dan biaya transportasi di daerah terpencil.
- Biaya Penggantian: Diperhitungkan untuk komponen dengan masa pakai lebih pendek (mis., BESS setelah 10-15 tahun).
- Manfaat Finansial (*Benefits*): Manfaat utama sistem *hybrid* dalam analisis ini adalah penghematan biaya bahan bakar PLTD yang substansial. Manfaat ini dihitung sebagai selisih antara biaya bahan bakar skenario *baseline* (PLTD 100%) dengan biaya bahan bakar pada skenario *hybrid*.
- Asumsi Kunci: Analisis memerlukan asumsi tentang *discount rate* (mencerminkan biaya modal dan risiko), umur proyek, *escalation rate* harga bahan bakar, serta harga dan kinerja peralatan di masa depan.

2.2.5 Metodologi Simulasi dan Optimasi dengan HOMER Pro

A. Arsitektur *Software* dan Pendekatan Pemodelan Fundamental

HOMER Pro dikembangkan oleh *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) sebagai alat pemodelan komprehensif yang mengintegrasikan kemampuan untuk simulasi, optimasi, dan analisis sensitivitas sistem energi *hybrid* dalam lingkungan *software* terpadu. Arsitektur fundamental HOMER Pro didasarkan pada pendekatan simulasi deret waktu yang memodelkan operasi sistem pada langkah waktu biasanya satu jam untuk seluruh tahun (8760 langkah waktu), memungkinkan penangkapan variasi musiman dan harian yang terperinci dalam ketersediaan sumber daya dan pola beban. Menurut Sinha & Chandel (2015), kekuatan utama HOMER Pro terletak pada kemampuannya untuk melakukan pencarian menyeluruh melalui semua konfigurasi sistem yang layak, mengevaluasi kinerja teknis dan ekonomi masing-masing konfigurasi, dan mengidentifikasi desain sistem optimal berdasarkan kriteria yang ditentukan pengguna seperti meminimalkan biaya siklus hidup atau memaksimalkan penetrasi energi terbarukan.

Proses simulasi dalam HOMER Pro melibatkan pemodelan matematis yang komprehensif untuk masing-masing komponen sistem. Untuk PLTS, model mencakup perhitungan keluaran energi berdasarkan data sumber daya surya, efek suhu, faktor *derating*, dan kehilangan konversi. BESS dimodelkan secara detail termasuk efisiensi pengisian/pengosongan, batasan kedalaman pengosongan, degradasi siklus hidup, dan penuaan kalender. PLTD dimodelkan dengan kurva konsumsi bahan bakar yang bervariasi dengan tingkat pembebanan, batasan beban minimum, dan persyaratan pemeliharaan. Interkoneksi antara komponen dimodelkan dengan kehilangan efisiensi yang sesuai untuk peralatan konversi daya seperti *inverter* dan penyearah. Strategi kontrol seperti *load following* dan *cycle charging* diimplementasikan melalui algoritma *dispatch* yang menentukan prioritas operasional masing-masing komponen berdasarkan aturan yang telah ditetapkan dan tujuan optimasi.

B. Persyaratan Data Input dan Pra-Pemrosesan

Kualitas hasil simulasi HOMER Pro sangat bergantung pada akurasi dan kelengkapan data input yang digunakan. Persyaratan Data Sumber Daya mencakup data deret waktu iradiasi surya (GHI dan DNI), suhu sekitar, dan jika relevan data kecepatan angin, dengan panjang data yang direkomendasikan minimal satu tahun untuk menangkap variasi musiman. Sumber data dapat berupa data tanah terukur, data turunan satelit, atau data sintetis yang dihasilkan dari model meteorologi tahunan tipikal. Data Beban harus merepresentasikan pola konsumsi listrik per jam untuk tahun tipikal, dengan segmentasi mungkin menurut kategori pelanggan (*residential*, *commercial*, *industrial*) dan pertimbangan proyeksi pertumbuhan beban sepanjang masa hidup proyek. Untuk daerah dengan data beban historis terbatas, pemodelan beban dapat dilakukan berdasarkan data demografi, survei kepemilikan peralatan, dan *benchmarking* komunitas serupa.

Spesifikasi teknis komponen mencakup parameter komprehensif untuk masing-masing teknologi termasuk kurva efisiensi, peringkat kapasitas, ekspektasi masa pakai, tingkat degradasi, dan kendala operasional. Parameter Ekonomi meliputi biaya modal, biaya O&M, biaya penggantian, biaya bahan bakar, tingkat diskonto, dan persyaratan pembiayaan proyek. Parameter Kontrol menentukan strategi operasional seperti aturan *dispatch*, algoritma

kontrol penyimpanan, dan target penetrasi energi terbarukan. HOMER Pro menyediakan *database* bawaan dengan nilai *default* untuk berbagai teknologi berdasarkan data pasar terkini, namun pengguna disarankan untuk melengkapinya dengan data spesifik proyek terutama untuk perkiraan biaya dan karakteristik kinerja. Pra-pemrosesan data mungkin diperlukan untuk konversi format, pengisian celah data, dan penjaminan kualitas sebelum digunakan dalam simulasi.

C. Analisis *Output* dan Interpretasi

HOMER Pro menghasilkan laporan *output* komprehensif yang mencakup berbagai dimensi kinerja sistem. Analisis Teknis meliputi perhitungan neraca energi, analisis faktor kapasitas, tingkat penetrasi energi terbarukan, penilaian probabilitas kehilangan beban, dan kuantifikasi konsumsi bahan bakar. Analisis Ekonomi memberikan rincian terperinci tentang biaya siklus hidup, perhitungan LCOE, analisis arus kas, evaluasi periode pengembalian modal, dan penilaian sensitivitas terhadap parameter input kritis. Analisis Lingkungan mengkuantifikasi potensi pengurangan emisi termasuk CO₂, SO₂, NO_x, dan partikulat, dengan opsi untuk menggabungkan harga karbon dalam evaluasi ekonomi.

Menurut Hafez & Bhattacharya (2017), interpretasi hasil HOMER Pro memerlukan pemahaman kritis tentang asumsi dasar dan batasan model. Konfigurasi sistem optimal yang diidentifikasi oleh HOMER Pro harus dievaluasi dalam konteks pertimbangan praktis seperti ketersediaan teknologi, kapasitas implementasi lokal, persyaratan pemeliharaan, dan faktor penerimaan sosial. Hasil analisis sensitivitas membantu mengidentifikasi faktor risiko kunci dan menginformasikan pengambilan keputusan yang kuat dalam ketidakpastian. Kemampuan visualisasi HOMER Pro memfasilitasi pemahaman komprehensif tentang perilaku sistem melalui plot deret waktu, bagan kinerja bulanan, dan analisis komparatif di berbagai skenario. Hasil *output* kemudian dapat digunakan sebagai dasar untuk desain teknik terperinci, pemodelan keuangan, pengambilan keputusan investasi, dan proses persetujuan peraturan.

2.2.6 Penurunan Emisi CO₂

A. Metodologi Perhitungan dan Faktor Emisi

Penurunan emisi karbon dioksida (CO₂) merupakan salah satu indikator kunci performa lingkungan dari sistem energi *hybrid*. Perhitungan emisi CO₂ didasarkan pada konsumsi bahan bakar fosil dan faktor emisi spesifik untuk setiap jenis bahan bakar. Metodologi yang umum digunakan mengacu pada panduan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), di mana emisi CO₂ dihitung dengan rumus:

$$\text{Emisi CO}_2 = \text{Konsumsi Bahan Bakar} \times \text{Faktor Emisi}$$

Untuk solar atau diesel, faktor emisi yang umum digunakan adalah 2.68 kg CO₂ per liter, berdasarkan nilai kalor bawah (*lower heating value*) dan kandungan karbon solar. Nilai ini telah diadopsi secara luas dalam studi-studi sistem *hybrid*, termasuk oleh NREL (2021) dalam laporan teknis mengenai dekarbonisasi sistem energi. Selain CO₂, sistem pembakaran diesel juga menghasilkan emisi lain seperti:

- SO₂ (Sulfur Dioksida): 0.002 kg per liter solar
- NO_x (Nitrogen Oksida): 0.052 kg per liter solar
- Partikulat Matter (PM): 0.001 kg per liter solar

Namun, fokus utama dalam penelitian ini adalah CO₂ sebagai gas rumah kaca utama penyebab perubahan iklim.

B. Mekanisme Penurunan Emisi pada Sistem *Hybrid*

Sistem *hybrid* PLTD, PLTS dan BESS menurunkan emisi CO₂ melalui dua mekanisme utama:

1. Substitusi Langsung: Setiap kWh listrik yang dihasilkan PLTS menggantikan kWh yang semestinya dihasilkan PLTD, sehingga secara langsung mengurangi konsumsi solar dan emisi CO₂. Dalam kondisi irradiasi matahari optimal, PLTS dapat mensubstitusi hingga 100% output PLTD pada siang hari.
2. Optimasi Operasi PLTD: Integrasi BESS memungkinkan PLTD beroperasi pada tingkat pembebanan yang lebih optimal. PLTD konvensional di daerah terpencil sering beroperasi pada faktor pembebanan rendah (20-40%) yang tidak efisien. Dengan sistem *hybrid*, PLTD dapat dimatikan saat beban ringan dan dinyalakan hanya pada beban puncak atau saat kondisi surya kurang,

sehingga beroperasi pada faktor pembebanan tinggi (60-80%) dengan efisiensi lebih baik.

Berdasarkan penelitian Sharma & Goel (2017), sistem *hybrid* dengan konfigurasi optimal dapat mencapai penurunan emisi CO₂ sebesar 60-80% dibandingkan dengan skenario *business-as-usual* (hanya PLTD). Penurunan signifikan ini terutama dicapai ketika *renewable fraction* sistem mencapai 50% atau lebih.

C. Valuasi Ekonomi dari Penurunan Emisi

Penurunan emisi CO₂ tidak hanya bernilai dari perspektif lingkungan, tetapi juga semakin bernilai secara ekonomi dengan berkembangnya mekanisme *carbon pricing*. Beberapa pendekatan valuasi yang relevan untuk konteks Indonesia:

1. Biaya Sosial Karbon: Estimasi kerugian sosial ekonomi akibat emisi CO₂, yang menurut Nordhaus (2017) berkisar antara USD 40-100 per ton CO₂.
2. Harga Pasar Karbon: Harga karbon dalam mekanisme perdagangan emisi, yang dalam beberapa skema internasional berkisar USD 20-50 per ton CO₂.
3. Ekuivalen Subsidi: Nilai setara subsidi yang dapat dijustifikasi berdasarkan manfaat lingkungan, yang untuk proyek energi terbarukan di Indonesia dapat dikonversi menjadi insentif fiskal atau *feed-in tariff*.

Dalam analisis kelayakan sistem *hybrid*, internalisasi nilai karbon dapat meningkatkan daya saing ekonomi sistem *hybrid* terhadap PLTD konvensional. Sebagai contoh, dengan asumsi *carbon price* USD 30 per ton CO₂, setiap penurunan 1 ton emisi CO₂ setara dengan penghematan USD 30 atau sekitar Rp 450,000 (asumsi kurs Rp 15,000/USD).

D. *Benchmarking* Penurunan Emisi pada Studi Serupa

Beberapa studi terdahulu memberikan referensi mengenai potensi penurunan emisi sistem *hybrid*:

1. Afif et al. (2023): Sistem *hybrid* di Kalimantan Timur berhasil mengurangi emisi CO₂ sebesar 68% dari 386 ton/tahun menjadi 128 ton/tahun.
2. Pratama et al. (2022): Implementasi di pulau terpencil Maluku mengurangi konsumsi solar 57% yang setara dengan penurunan emisi CO₂ 55-60%.

3. IRENA (2023): Dalam skenario global, sistem *hybrid* surya-diesel-baterai dapat mengurangi intensitas karbon listrik dari $>800 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ menjadi $<200 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$.

E. Metrik dan Pelaporan Keberlanjutan

Di luar sekadar perhitungan kuantitatif, penurunan emisi CO_2 perlu dikomunikasikan dalam kerangka keberlanjutan yang lebih luas:

1. Pengurangan CO_2 per kWh: Penurunan emisi per unit energi yang dihasilkan (gCO_2/kWh)
2. Rasio Energi Terbarukan: Persentase kontribusi energi terbarukan dalam campuran pembangkitan
3. Intensitas Karbon: Total emisi CO_2 per unit PDB atau per kapita
4. Kesesuaian SDG: Kesesuaian dengan *Sustainable Development Goals*, khususnya Goal 7 (Energi Bersih dan Terjangkau) dan Goal 13 (Penanganan Perubahan Iklim)

Pelaporan performa lingkungan ini semakin penting dengan berkembangnya standar ESG (*Environmental, Social, and Governance*) dan permintaan transparansi dari stakeholders.

Tabel 2.1 Faktor Emisi Untuk Berbagai Jenis Bahan Bakar

Carbon Dioxide (CO ₂) Factors:	Pounds CO ₂	Kilograms CO ₂	Pounds CO ₂	Kilograms CO ₂
	Per Unit of Volume or Mass	Per Unit of Volume or Mass	Per Million Btu	Per Million Btu
For homes and businesses				
Propane	12.68 gallon	5.75 gallon	138.63	62.88
Diesel and Home Heating Fuel (Distillate Fuel Oil)	22.45 gallon	10.19 gallon	163.45	74.14
Kerosene	21.78 gallon	9.88 gallon	161.35	73.19
Coal (All types)	3,690.78 short ton	1,764.83 short ton	211.47	95.92
Natural Gas	120.96 thousand cubic feet	54.87 thousand cubic feet	116.65	52.91
Finished Motor Gasoline ^a	17.86 gallon	8.10 gallon	148.57	67.39
Motor Gasoline	19.37 gallon	8.78 gallon	155.77	70.66
Residual Heating Fuel (Businesses only)	24.78 gallon	11.24 gallon	165.55	75.09
Other transportation fuels				
Jet Fuel	21.50 gallon	9.75 gallon	159.25	72.23
Aviation Gas	18.32 gallon	8.31 gallon	152.46	69.15
Industrial fuels and others not listed above				
Petroleum coke	32.88 gallon	14,920 gallon	225.13	102.12
Nonfuel uses				
Asphalt and Road Oil	26.26 gallon	11.01 gallon	166.12	76.26
Lubricants	23.58 gallon	10.70 gallon	163.29	74.07
Naphthas for Petrochemical Feedstock Use	18.74 gallon	8.50 gallon	149.95	68.02
Other Oils for Petrochemical Feedstock Use	22.61 gallon	10.26 gallon	163.05	73.96
Special Naphthas (solvents)	19.94 gallon	9.04 gallon	159.57	72.38
Waxes	21.10 gallon	9.57 gallon	160.06	72.60
Coals by type				
Anthracite	5,735.68 short ton	2,601.67 short ton	228.60	103.69
Bituminous	4,783.52 short ton	2,169.77 short ton	205.57	93.24
Subbituminous	3,745.22 short ton	1,698.80 short ton	214.13	97.13
Lignite	2,809.83 short ton	1,274.52 short ton	216.64	98.27
Coke	7,183.46 short ton	3,258.37 short ton	250.59	113.67
Other fuels				
Geothermal (steam)	NA	NA	26.03	11.81
Geothermal (binary cycle)	NA	NA	0.00	0.00
Municipal solid waste ^{b,c}	1,562.78 short ton	706.87 short ton	109.98	49.89
Tire-derived fuel ^b	5,306.87 short ton	2,407.16 short ton	189.53	85.97
Waste oil ^b	22.51 gallon	10.21 gallon	163.14	74.00