

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Manajemen Energi Pada Sistem Hibrida (PLTS & PLTD)

Tinjauan literatur berdasarkan pedoman fundamental tata kelola energi menggarisbawahi bahwa filosofi utama dari manajemen energi pada sistem hibrida bertujuan mencapai keseimbangan (ekuilibrium) antara keandalan pasokan daya dan optimalisasi pengeluaran finansial (Capehart et al., 2016). Dalam lanskap penggabungan pembangkit terdesentralisasi, khususnya konfigurasi energi surya dan generator diesel, protokol manajemen yang ketat diwajibkan untuk menyerap kapasitas energi terbarukan secara maksimal demi mengurangi eksploitasi bahan bakar konvensional secara terukur (Capehart et al., 2016). Efektivitas dari infrastruktur kelistrikan hibrida semacam ini amat bergantung pada integrasi instrumen kendali cerdas yang mampu mengatur pembebanan (*load dispatching*) secara presisi, sehingga mesin diesel hanya akan dioperasikan ketika radiasi matahari menurun hingga batas defisit daya (Capehart et al., 2016). Di samping itu, kerangka evaluasi tata kelola menegaskan bahwa tingkat kesuksesan integrasi sistem tidak boleh semata-mata dinilai dari penurunan volume bahan bakar secara langsung, melainkan harus dievaluasi menggunakan parameter biaya siklus hidup (*life-cycle cost*) yang memproyeksikan beban operasional dan pemeliharaan seluruh komponen dalam jangka panjang (Capehart et al., 2016). Pada akhirnya, standarisasi manajemen energi berperan penting dalam mengonversi fluktuasi sumber daya alam menjadi aliran listrik yang stabil, efisien, dan rasional secara ekonomi (Capehart et al., 2016).

Kajian literatur terkini mengonfirmasi bahwa efektivitas manajemen energi pada sistem hibrida sejatinya sangat bergantung pada fleksibilitas arsitektur kendali daya (*dispatch strategy*) yang diterapkan oleh operator. Penerapan strategi gabungan—yang secara cerdas mengkombinasikan metode pengikutan beban (*load-following*) untuk optimalisasi penyerapan daya di siang hari dan strategi siklus pengisian (*cycle-charging*)

untuk menjaga ketersediaan energi pada periode beban puncak—terbukti secara komprehensif mampu menurunkan *Net Present Cost* (NPC) sekaligus mereduksi tarif beban kelistrikan secara signifikan dibanding pola pengoperasian generator konvensional yang statis (Aziz et al., 2019). Temuan mengenai efisiensi biaya dan penguatan sistem melalui optimalisasi bauran energi ini sejalan dengan konsep *Intelligent Energy Management* pada *microgrid*, mengingat optimasi terkoordinasi antara sumber EBT, penyimpanan energi, dan fleksibilitas beban dapat menurunkan *operating costs* sekaligus meningkatkan reliabilitas dan kontinuitas pasokan daya (Damiri et al., 2025)

2.1.2 Karakteristik Sistem Ketenagalistrikan Wilayah Terisolasi

Tinjauan literatur mengenai karakteristik sistem ketenagalistrikan wilayah terisolasi (*isolated power systems*) menunjukkan adanya dinamika transisi dari jaringan konvensional menuju arsitektur hibrida modern yang kompleks. Secara historis, infrastruktur kelistrikan di wilayah terpencil memiliki karakteristik ketergantungan yang tinggi pada dominasi generator mekanis berbahan bakar fosil; mesin diesel ini tidak sekadar bertindak sebagai penyedia daya beban dasar, melainkan memegang peran krusial dalam menyuplai inersia berputar (*rotating inertia*) guna merawat ketahanan sirkuit terhadap gangguan korsleting (Mangunkusumo et al., 2025). Meskipun demikian, pola operasi tunggal ini memicu pembengkakan biaya pembangkitan (*Levelized Cost of Energy*) yang masif dan peningkatan emisi gas rumah kaca/karbon, yang pada akhirnya mendesak integrasi sumber energi baru terbarukan (EBT) secara eksponensial.

Sumber energi terbarukan telah mendorong transformasi sistem kelistrikan di seluruh dunia. Salah satu tren utama dalam pengembangan energi baru terbarukan adalah fotovoltaik (PV) dan turbin angin. Sumber energi tersebut memiliki karakteristik yang tidak teratur, sehingga integrasinya ke dalam jaringan listrik memerlukan perhatian khusus. Hal ini juga terjadi pada Sistem Jawa-Bali, jaringan listrik terbesar di Indonesia (Marbun et al., 2018).

Sayangnya, transisi pembauran energi ini memunculkan karakteristik kerentanan teknis yang sangat spesifik. Penetrasi energi surya dan turbin angin menurunkan total inersia sistem, yang berdampak pada meningkatnya kerentanan jaringan mikro terisolasi terhadap fluktuasi frekuensi dan tegangan apabila terjadi guncangan beban transien

seketika (Youssef et al., 2023). Guna menjembatani paradoks antara tuntutan efisiensi dan keandalan jaringan, literatur menegaskan bahwa sistem kelistrikan terisolasi mutlak diwajibkan mengadopsi kerangka kontrol daya yang komplementer; arsitektur operasional ini menuntut pelibatan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) untuk menetralisasi osilasi ketidakseimbangan energi dalam hitungan detik, sementara generator diesel dipertahankan murni sebagai elemen penyeimbang untuk menjamin ekuilibrium pasokan daya dalam jangka waktu yang panjang (Chang et al., 2019).

BESS adalah salah satu solusi untuk sifat intermitensi energi baru terbarukan, terutama di sistem mikrogrid yang dioperasikan dengan instalasi fotovoltaik (PV). Tujuan utama BESS adalah mengurangi variabilitas beban daya listrik dengan mengubah mekanisme pengisian dan pengosongan. Dari perspektif pengurangan variabilitas beban, diharapkan jumlah mesin diesel yang digunakan akan berkurang (Rendroyoko et al., 2024).

2.1.3 Kinerja Pembangkit (EAF, EFOR, CF, SFC, SF, LF)

Secara komprehensif, evaluasi kinerja pembangkit listrik secara komprehensif mutlak bertumpu pada enam indikator fundamental, yakni *Equivalent Availability Factor* (EAF), *Equivalent Forced Outage Rate* (EFOR), *Capacity Factor* (CF), *Specific Fuel Consumption* (SFC), *Service Factor* (SF), serta *Load Factor* (LF) (Firstantara et al., 2025). Parameter EAF merepresentasikan persentase akumulasi waktu kesiapan operasional sebuah turbin atau generator untuk mendistribusikan daya kelistrikan secara penuh ke dalam sistem jaringan, tanpa terhambat oleh jadwal pemeliharaan rutin maupun kerusakan tak terduga, sementara indikator SF secara empiris memetakan proporsi waktu riil di mana turbin benar-benar beroperasi dan tersinkronisasi penuh dengan jaringan kelistrikan aktif. (Bukar et al., 2019).

$$EAF = \frac{AH}{PH} \times 100\%$$

- AH = Available Hours (Total jam unit pembangkit siap beroperasi).
- PH = Period Hours (Total jam dalam satu periode pengamatan, misalnya 720 jam untuk satu bulan).

$$SF = \frac{SH}{PH} \times 100\%$$

- *SH*= *Service Hours* (Total jam unit pembangkit sinkron ke jaringan).
- *PH*= *Period Hours* (Total jam dalam satu periode pengamatan).

Berkebalikan dengan indikator ketersediaan daya tersebut, tingkat ketidaksiapan operasional sistem secara spesifik ditakar melalui metrik EFOR yang menghitung probabilitas terhentinya operasi mesin secara paksa akibat malfungsi mendadak; melonjaknya persentase indikator ini menjadi sinyal paling kritis yang merepresentasikan kerentanan pembangkit terhadap potensi pemadaman kelistrikan secara total (Firstantara et al., 2025).

$$EFOR = \frac{FOH}{FOH + SH} \times 100\%$$

- *FOH*= *Forced Outage Hours* (Total jam unit pembangkit keluar dari sistem secara paksa/gangguan).
- *SH*= *Service Hours* (Total jam unit pembangkit beroperasi dan sinkron dengan jaringan).

Sementara itu, tingkat utilitas aktual dari infrastruktur pembangkitan dievaluasi secara matematis melalui instrumen CF, yakni sebuah rasio yang membandingkan agregat produksi energi riil dengan batas ekuivalen daya maksimum yang mampu diekstraksi secara teoretis sepanjang satu periode kalender (Lee et al., 2021).

$$CF = \frac{E_{aktual}}{P_{max} \times PH} \times 100\%$$

- *E_{aktual}*= Total produksi energi listrik aktual selama periode tertentu (kWh atau MWh).
- *P_{max}*= Kapasitas terpasang atau daya mampu maksimum pembangkit (kW atau MW).
- *PH*= *Period Hours* (Jam periode pengamatan).

Beriringan dengan hal tersebut, analisis kestabilan pasokan diukur melalui instrumen LF yang menakar rasio beban rata-rata terhadap beban puncak harian guna memastikan ekuilibrium serapan daya tidak berfluktuasi secara ekstrem (Oladigbolu et al., 2019).

$$LF = \frac{P_{avg}}{P_{peak}} \times 100\%$$

- P_{avg} = Beban rata-rata harian atau bulanan (kW atau MW).
- P_{peak} = Beban puncak tertinggi (*peak load*) yang tercatat pada periode yang sama (kW atau MW).

Pada dimensi efisiensi termodinamika, rasionalitas operasi mesin pembakaran internal ditakar menggunakan indikator SFC, yang menghitung volume presisi bahan bakar fosil yang dikorbankan demi mengeksekusi setiap satuan kilowatt-jam energi listrik (Mobarra et al., 2022).

$$SFC = \frac{V_{fuel}}{E_{aktual}}$$

- V_{fuel} = Volume pemakaian bahan bakar secara aktual (dalam satuan Liter untuk HSD/MFO).
- E_{aktual} = Total produksi energi listrik aktual (kWh).
- Satuan SFC: Liter/kWh. Semakin kecil nilai SFC, semakin efisien kinerja pembangkit tersebut.

Konklusinya, penurunan angka SFC dan EFOR yang diiringi oleh peningkatan nilai EAF serta CF terbukti mampu mengunci keandalan pasokan listrik sekaligus menyusutkan biaya operasi menuju keseimbangan terendah (Aziz et al., 2019).

2.1.4 Komponen Biaya Operasi Pembangkit dan Harga Bahan Bakar

Tinjauan literatur mengenai komponen Biaya Operasi Pembangkit atau Biaya Pokok Penyediaan (BPP) menunjukkan adanya bahwa struktur keekonomian sistem kelistrikan sangat didominasi oleh volatilitas harga komoditas energi (Hidalgo-Leon et al., 2021). Secara fundamental, kalkulasi BPP pada infrastruktur pembangkitan selalu dipecah ke dalam matriks biaya modal tetap (*capital cost*), ongkos perawatan dan pemeliharaan rutin (*operation and maintenance*), serta biaya variabel bahan bakar (Oviroh & Jen, 2018). Di antara seluruh elemen finansial tersebut, biaya belanja bahan bakar minyak menjadi faktor pengeluaran terbesar yang secara langsung meningkatkan total biaya operasional (Hidalgo-Leon et al., 2021). Kondisi ini menyebabkan metrik kelayakan proyek, seperti *Levelized Cost of Energy* (LCOE), menjadi rentan dan sensitif terhadap fluktuasi harga bahan bakar solar di pasar dunia (Oviroh & Jen, 2018). Sebagai langkah mitigasi finansial, riset membuktikan bahwa pemangkasan rasio biaya bahan bakar dari kalkulasi BPP mutlak membutuhkan substitusi sumber daya; dengan bantuan baterai, penetrasi energi terbarukan telah terbukti efektif untuk mengurangi biaya operasi

sehari-hari tanpa memperhatikan bagaimana harga bahan bakar fosil melonjak (Oladigbolu et al., 2019).

2.1.5 Konsep *Partial Least Square Structural Equation Modeling*

Pendekatan berbasis *Partial Least Square Structural Equation Modeling* (PLS-SEM) diakui secara luas sebagai metode statistika multivariat generasi kedua yang difokuskan pada maksimalisasi varians dari variabel dependen, menjadikannya sangat tangguh untuk membedah relasi prediktif dalam arsitektur kerangka konseptual yang sangat rumit (Henseler et al., 2016). Berbeda dengan pemodelan persamaan struktural tradisional yang bertumpu pada matriks kovarians dan sangat ketat pada konfirmasi teori, algoritma komputasi PLS dirancang secara khusus untuk memfasilitasi riset dengan tujuan eksplorasi pengembangan model baru; fleksibilitas ini memberikan kelonggaran mutlak terhadap asumsi distribusi data parametrik (tidak wajib berdistribusi normal) sehingga sangat relevan digunakan pada ukuran sampel yang serba terbatas (Hair et al., 2019). Konstruksi evaluasi pada instrumen ini memecah kerangka kerja ke dalam dua tahapan analitik yang esensial; yakni pengujian model pengukuran (*outer model*) guna memvalidasi ketepatan setiap indikator sebagai pembentuk variabel laten, serta pengujian model struktural (*inner model*) yang ditugaskan murni untuk mengukur level signifikansi dan arah kausalitas antarvariabel (Sarstedt et al., 2017). Lebih jauh lagi, ketangguhan matematis dari pendekatan varians ini secara leluasa mengizinkan para akademisi untuk mengintegrasikan konstruksi variabel berdimensi formatif maupun reflektif ke dalam satu ekosistem simulasi yang sama, tanpa harus khawatir memicu fenomena malafungsi identifikasi model pada saat pengujian hipotesis (Henseler et al., 2016). Keseluruhan karakteristik ini mendudukan PLS-SEM sebagai instrumen pengolahan data kuantitatif yang paling mumpuni untuk mengeksekusi model jalur (*path model*) berskala besar yang memuat banyak hipotesis silang di dalamnya (Hair et al., 2019).

2.2 Penelitian yang Relevan

2.2.1 Kinerja PLTD Terhadap Stabilitas Sistem Ketenagalistrikan

Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) memainkan fungsi sentral dalam menopang keandalan operasional kelistrikan, khususnya pada lanskap jaringan terisolasi atau sistem hibrida. Secara fundamental, mesin diesel sering kali diplot sebagai pondasi pasokan utama untuk merawat kesinambungan daya dasar sekaligus meregulasi ketidakseimbangan sistem secara mekanis. Beberapa riset empiris mengonfirmasi bahwa operasional unit diesel memberikan sumbangsih positif yang signifikan melalui suntikan inersia fisik yang esensial guna meminimalkan lonjakan osilasi frekuensi, sehingga mesin ini berfungsi sebagai menjadi penyeimbang daya puncak yang secara efektif memproteksi jaringan kelistrikan dari perubahan beban secara tiba-tiba (Wu et al., 2022).

Di sisi berseberangan, perspektif akademik lain justru menyoroti konsekuensi negatif dari dominasi pembangkit ini ketika berhadapan dengan penetrasi tinggi dari sumber energi baru terbarukan. Karakteristik fluktuatif dari radiasi surya maupun angin acapkali memaksa mesin diesel bekerja dalam rentang beban parsial yang sangat tidak efisien. Terbatasnya kecepatan respons transien pada generator diesel konvensional dinilai gagal mengakomodasi variasi beban seketika yang sangat dinamis, sebuah kondisi yang justru berisiko memperburuk deviasi frekuensi hingga memicu kolapsnya stabilitas sistem secara meluas (Mi et al., 2022). Mengandalkan PLTD semata sebagai garda terdepan regulasi kelistrikan dalam *grid* terbarukan terbukti dapat mengekspos jaringan pada kerentanan tegangan kritis.

Menengahi paradoks tersebut, kajian literatur terkini menguraikan temuan lain bahwa pengaruh kinerja PLTD bersifat kondisional dan sangat bergantung pada arsitektur ekosistem kontrol yang mendampinginya. Kapabilitas mesin diesel dalam merawat profil jaringan yang kokoh menuntut adanya pelibatan perangkat kompensasi sekunder. Penambahan teknologi modern seperti sistem penyimpanan daya berbasis baterai (BESS) terintegrasi maupun intervensi inverter cerdas multifungsi terbukti krusial dalam menyediakan inersia *virtual*, yang secara taktis mampu mengompensasi lambatnya laju respons mekanis PLTD (Eid et al., 2024). Dengan kata lain, signifikansi pengaruh PLTD

terhadap stabilitas jaringan tidak berfungsi secara tunggal, melainkan amat ditentukan oleh sinergi tata kelola elemen pendukung yang menyertainya.

2.2.2 Kinerja PLTD Terhadap Pemakaian Bahan Bakar

Tinjauan literatur mengenai relasi antara kinerja operasional Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dan tingkat pemakaian bahan bakar memperlihatkan dinamika yang bervariasi, yang hasilnya sangat bergantung pada metrik evaluasi beban yang digunakan.

Berdasarkan perspektif pengaruh positif, peningkatan beban operasional PLTD terbukti berkorelasi selaras dengan peningkatan total konsumsi bahan bakar secara absolut. Sejumlah temuan riset mengonfirmasi bahwa ketika unit diesel beroperasi pada kapasitas keluaran daya yang lebih tinggi untuk merespons permintaan kelistrikan yang tinggi, injeksi bahan bakar ke dalam ruang bakar akan meningkat secara proporsional guna menjaga kelajuan putaran poros tetap stabil (Issa et al., 2020). Artinya, tingginya kinerja generator dalam mendistribusikan daya kelistrikan akan mengakibatkan peningkatan volume bahan bakar yang digunakan.

Sebaliknya, pendekatan efisiensi justru membuktikan adanya pengaruh negatif antara performa optimal mesin terhadap rasio pemakaian bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Consumption*). Para peneliti menemukan bahwa ketika kinerja PLTD ditingkatkan dan dijaga pada rentang beban kerjanya yang paling ideal, yakni di atas tujuh puluh persen dari kapasitas nominalnya, indikator pemakaian bahan bakar per satuan energi listrik yang diproduksi mengalami penurunan yang signifikan (Mobarra et al., 2022). Peningkatan kinerja termodinamika pada fase optimal ini berhasil menekan inefisiensi energi secara signifikan, yang membuktikan bahwa performa mesin yang tinggi dapat menekan rasio pengeluaran bahan bakar secara efektif.

Sebagai pelengkap, studi terkini juga mengungkapkan temuan lain terkait kerentanan PLTD saat diintegrasikan dalam skema kelistrikan hibrida yang dinamis. Ketika generator diesel beroperasi secara fluktuatif pada beban parsial yang sangat rendah untuk mengakomodasi intermitensi dari sumber energi terbarukan, mesin justru akan mengalami penurunan efisiensi yang signifikan (Zaky Zaim Muhtadi et al., 2023).

Kondisi operasional beban parsial tersebut mengakibatkan pembakaran tidak sempurna yang meningkatkan laju konsumsi bahan bakar spesifik melampaui batas standar spesifikasi pabrikan (Issa et al., 2020).

2.2.3 Kinerja PLTS Terhadap Stabilitas Sistem Ketenagalistrikan

Tinjauan literatur mengenai dampak kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terhadap keandalan sistem ketenagalistrikan menunjukkan temuan yang beragam. Dari sudut pandang positif, penetrasi energi surya terbukti mampu meningkatkan keandalan jaringan kelistrikan secara komprehensif dengan mendiversifikasi bauran pasokan daya, mengurangi beban pada periode beban puncak, serta mereduksi probabilitas pemadaman apabila dikelola melalui manajemen ketidakpastian yang terukur (Thapa et al., 2025). Meskipun demikian, sejumlah peneliti mengidentifikasi adanya pengaruh negatif akibat karakteristik intermitensi dari radiasi matahari. Fluktuasi cuaca harian memicu perubahan pasokan daya seketika, yang pada akhirnya mengganggu kestabilan frekuensi maupun tegangan jaringan apabila tingkat penetrasi surya melampaui batas inersia sistem (Pandit et al., 2022). Guna mengatasi tantangan tersebut, temuan eksperimental lain menegaskan bahwa keandalan jaringan berbasis PLTS sangat bergantung pada infrastruktur pendamping; pembangkit surya hanya dapat beroperasi dengan andal jika diintegrasikan bersama sistem penyimpanan energi guna meredam osilasi daya dan menyuplai cadangan keamanan frekuensi secara dinamis (Pandit et al., 2021). Dalam skema operasi sistem tenaga, BESS dapat dimanfaatkan sebagai pendukung pengendalian frekuensi untuk mengurangi dampak gangguan *under-frequency* dan meningkatkan keandalan sistem (Arifin & Firmanto, 2021).

2.2.4 Kinerja PLTS Terhadap Pemakaian Bahan Bakar

Tinjauan literatur terkait dampak kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terhadap tingkat pemakaian bahan bakar memperlihatkan temuan yang beragam. Dari perspektif yang menguntungkan, integrasi sistem energi surya terbukti mampu menurunkan volume konsumsi bahan bakar diesel secara signifikan pada jaringan kelistrikan hibrida. Para peneliti mendapati bahwa kinerja PLTS yang optimal dapat menyuplai pasokan beban kelistrikan dasar, sehingga mesin diesel cukup dioperasikan saat terjadi anomali atau periode kritis saja; strategi operasional ini secara menurunkan

pengeluaran pemeliharaan dan menghemat bahan bakar secara substansial (Pérez Uc et al., 2026).

Sebaliknya, sejumlah studi terkini justru mengungkap adanya dampak negatif terhadap efisiensi bahan bakar akibat penetrasi surya yang sangat tinggi tanpa tata kelola yang tepat. Karakteristik radiasi matahari yang intermiten dan sangat dinamis kerap memaksa unit generator diesel konvensional untuk terus menyala (*spinning reserve*) dan beroperasi pada beban parsial yang terlalu rendah, sebuah skenario operasional yang pada akhirnya mengurangi efisiensi termodinamika mesin dan meningkatkan rasio pemakaian bahan bakar spesifik secara signifikan (Mobarra et al., 2022).

Sebagai solusi dari tantangan efisiensi tersebut, temuan eksperimental lainnya menegaskan bahwa ekuilibrium konsumsi bahan bakar hanya dapat dicapai apabila sistem surya diintegrasikan dengan arsitektur penyimpanan daya. Pelibatan perangkat baterai litium-ion terbukti sangat esensial untuk meredam fluktuasi pasokan surya sekaligus menekan frekuensi aktivasi dan deaktivasi (*cycling*) mesin diesel, sehingga tingkat efisiensi pembakaran bahan bakar pada generator dapat dipertahankan secara optimal dan konstan sepanjang waktu (Kiray et al., 2021).

2.2.5 Kinerja PLTS Terhadap Total Produksi Energi Listrik

Tinjauan literatur mengenai dampak kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terhadap total produksi energi listrik menunjukkan temuan yang saling melengkapi. Dari perspektif pengaruh positif, optimalisasi kinerja panel surya—terutama melalui konfigurasi kemiringan dan orientasi modul yang presisi—terbukti secara langsung mampu meningkatkan total produksi daya listrik yang diproduksi secara signifikan sepanjang tahun operasionalnya (Choi et al., 2019). Pengaruh iradiasi matahari yang diterima sistem dan kinerja sistem fotovoltaik, yang keduanya ditunjukkan dalam rasio kinerja (PR), memengaruhi produksi energi listrik PLTS. Dengan demikian, peningkatan kinerja sistem menghasilkan lebih banyak energi keluaran AC yang disalurkan ke jaringan (Damiri & Nugraha, 2021).

Namun demikian, sejumlah peneliti menyoroti efek negatif atau batasan apabila tingginya kapasitas produksi ini bersinggungan dengan keterbatasan infrastruktur. Ketika

kinerja PLTS mencapai daya maksimum pada siang hari, sistem kerap kali terpaksa mengalami fenomena *curtailment* atau pemangkasan daya secara paksa, kondisi yang mengakibatkan terbuangnya potensi energi surya dan menurunkan total produksi listrik yang dapat diserap oleh jaringan (Guo et al., 2021). Guna memitigasi tantangan tersebut, studi lanjutan menggarisbawahi bahwa tingginya performa keluaran PLTS hanya akan berkontribusi secara optimal pada total produksi energi apabila sistem ini diintegrasikan dengan sistem penyimpanan energi secara dinamis (Basmadjian, 2020).

2.2.6 Harga Satuan Bahan Bakar Terhadap Biaya Operasi Pembangkit

Tinjauan literatur mengenai interaksi antara harga satuan bahan bakar dan biaya operasi pembangkit mengonfirmasi bahwa fluktuasi komoditas energi fosil merupakan faktor utama dalam struktur beban finansial kelistrikan. Dari sudut pandang korelasi positif, sejumlah peneliti sepakat bahwa setiap kenaikan tarif bahan bakar solar di pasar akan secara langsung meningkatkan pengeluaran operasional harian, yang pada akhirnya berdampak pada peningkatan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) secara agregat pada jaringan yang mengandalkan mesin pembakaran internal (Oviroh & Jen, 2018). Sebaliknya, literatur lain mengidentifikasi adanya korelasi negatif terhadap tren biaya ketika harga bahan bakar naik; tingginya harga pasar bahan bakar diesel secara tidak langsung memaksa operator pembangkit untuk mengurangi jam operasi unit mesin diesel secara signifikan demi beralih pada pemanfaatan energi terbarukan, yang pada akhirnya mampu menurunkan total beban operasional harian (Oladigbolu et al., 2019). Melengkapi kedua temuan tersebut, studi sensitivitas kelistrikan membuktikan bahwa tingkat kerentanan biaya operasi terhadap fluktuasi harga bahan bakar sejatinya bersifat sangat dinamis dan dapat dikurangi. Ketahanan tersebut sangat bergantung pada seberapa besar kapasitas cadangan baterai yang diintegrasikan dalam sistem hibrida untuk meredam intermitensi (Fodhil et al., 2019).

2.2.7 Harga Satuan Bahan Bakar Terhadap Produksi Energi Listrik

Tinjauan literatur mengenai pengaruh harga satuan bahan bakar terhadap produksi energi listrik memaparkan adanya pergeseran strategi penjadwalan bauran energi akibat faktor keekonomian. Salah satu kendala utama dengan penyediaan listrik di pulau

terpencil adalah proses distribusi bahan bakar. Hal ini menyebabkan harga bahan bakar mahal dan jumlah bahan bakar yang terbatas (Alvianingsih et al., 2021).

Dari sudut pandang korelasi positif, tren kenaikan harga bahan bakar diesel terbukti secara empiris memicu peningkatan volume produksi listrik yang bersumber dari infrastruktur energi terbarukan; tingginya biaya operasional memaksa sistem hibrida untuk meningkatkan suplai daya dari panel surya dan baterai secara maksimal guna memenuhi kebutuhan beban (Hidalgo-Leon et al., 2021). Sebaliknya, pada sisi pengaruh negatif, eskalasi tarif bahan bakar ini berdampak pada penurunan kuantitas produksi energi listrik yang berasal dari generator diesel konvensional; mesin pembakaran internal dikurangi hingga tingkat minimum jam operasionalnya guna menekan kerugian finansial (Fodhil et al., 2019). Melengkapi kedua temuan tersebut, studi tekno-ekonomi terkini menemukan fakta krusial bahwa terlepas dari tingkat fluktuasi harga bahan bakar, kuantitas total energi listrik yang diproduksi secara agregat oleh sistem kelistrikan akan cenderung konstan, mengingat volume daya keluaran pembangkit diwajibkan untuk selalu menyeimbangkan kurva permintaan beban konsumen setiap saat (Oviroh & Jen, 2018).

2.2.8 Kondisi Sistem Ketenagalistrikan Terhadap Pemakaian Bahan Bakar

Tinjauan literatur mengenai pengaruh kondisi sistem ketenagalistrikan terhadap konsumsi bahan bakar menyingkap kausalitas erat antara stabilitas jaringan dengan efisiensi termodinamika. Dari perspektif pengaruh positif, memburuknya kondisi jaringan akibat fluktuasi beban harian yang ekstrem secara empiris akan memaksa generator diesel beroperasi pada rentang beban parsial yang fluktuatif, sebuah situasi yang meningkatkan rasio konsumsi bahan bakar secara signifikan hingga melebihi spesifikasi standar pabrikan (Soto, 2018). Sebaliknya, dari perspektif pengaruh negatif, peningkatan kualitas dan keandalan sistem kelistrikan yang dicapai melalui pemerataan profil daya terbukti dapat menurunkan volume pemakaian bahan bakar secara signifikan; kondisi kelistrikan yang stabil memungkinkan mesin pembakaran beroperasi secara konstan tepat di titik efisiensi puncaknya (Oladigbolu et al., 2019). Sebagai temuan pelengkap, kerentanan konsumsi bahan bakar terhadap fluktuasi kondisi sistem pada akhirnya ditentukan oleh tata kelola manajemen energi yang diimplementasikan;

penerapan strategi pengikutan beban (*load-following*) terbukti mampu mencegah efek negatif ketidakstabilan jaringan, sehingga bahan bakar fosil hanya dikonsumsi sebagai opsi cadangan (Costa et al., 2019).

2.2.9 Kondisi Sistem Ketenagalistrikan Terhadap Biaya Operasi Pembangkit

Tinjauan literatur mengenai pengaruh kondisi sistem ketenagalistrikan terhadap biaya operasi pembangkit menunjukkan adanya hubungan kausalitas yang kuat antara stabilitas infrastruktur kelistrikan dan efisiensi pengeluaran finansial. Dari perspektif pengaruh positif, dinamika kondisi jaringan yang mengalami intermitensi serta fluktuasi beban ekstrem terbukti secara empiris akan meningkatkan biaya operasional secara signifikan; ketidakstabilan ini menuntut sistem untuk terus-menerus melakukan kompensasi daya secara signifikan, sebuah fenomena mekanis yang mempercepat keausan komponen sehingga meningkatkan biaya pemeliharaan secara substansial (Saeed et al., 2023). Sebaliknya, dari perspektif pengaruh negatif, peningkatan kualitas dan keandalan sistem kelistrikan justru berdampak pada penurunan yang signifikan pada struktur biaya; perancangan kerangka operasi yang mengoptimalkan kinerja frekuensi jaringan berhasil mengurangi beban kerja pada mesin pembangkit utama, yang secara matematis menurunkan total pengeluaran sistem harian (Lee et al., 2021). Lebih lanjut, pemodelan arsitektur kelistrikan hibrida terkini menggarisbawahi bahwa kerentanan beban biaya terhadap ketidakstabilan kondisi sistem dapat dimitigasi secara efektif; intervensi menggunakan strategi manajemen daya terencana (*load-following*) terbukti mampu mereduksi kerugian ekonomi secara signifikan ketika parameter jaringan berfluktuasi (Rayhan et al., 2023).

2.2.10 Kondisi Sistem Ketenagalistrikan Terhadap Produksi Energi Listrik

Tinjauan literatur mengenai pengaruh kondisi sistem ketenagalistrikan terhadap total produksi energi listrik menunjukkan adanya relasi interdependensi antara kapasitas infrastruktur dan volume daya terpasok. Dari perspektif pengaruh positif, peningkatan keandalan jaringan melalui optimasi layanan cerdas terbukti meningkatkan produksi energi listrik secara substansial; sistem yang stabil mengeliminasi hambatan interkoneksi, sehingga memungkinkan pembangkit hibrida memproduksi sekaligus menyalurkan daya pada kapasitas maksimal tanpa terkena restriksi teknis (Lopez Alzate et al., 2024).

Sebaliknya, dari perspektif pengaruh negatif, memburuknya stabilitas sistem akibat anomali tegangan dan osilasi frekuensi akan memicu intervensi protektif dari instrumen kontrol untuk mengurangi pasokan daya (*curtailment*); ketidakstabilan kondisi jaringan tersebut secara langsung membatasi total energi yang bisa diproduksi (Lee et al., 2021). Melengkapi dinamika tersebut, studi terkini membuktikan bahwa kerentanan tingkat produksi terhadap fluktuasi sistem kelistrikan sebenarnya dapat dikurangi; implementasi sistem penyimpanan energi baterai (BESS) mampu menyerap sisa kelebihan daya secara otonom, sehingga keberlangsungan total produksi energi generator tidak lagi bergantung pada fluktuasi jaringan transien (Xu et al., 2023).

2.2.11 Pemakaian Bahan Bakar Terhadap Biaya Operasi Pembangkit

Tinjauan literatur mengenai relasi antara tingkat pemakaian bahan bakar dan biaya operasi pembangkit menegaskan posisi bahan bakar solar sebagai variabel paling dominan dalam struktur pengeluaran finansial kelistrikan. Dari sudut pandang korelasi positif, eskalasi volume konsumsi bahan bakar fosil harian terbukti secara empiris berbanding lurus dengan peningkatan total biaya operasional, setiap tambahan liter pembakaran akan berkontribusi langsung terhadap peningkatan metrik *Levelized Cost of Energy* (LCOE) pembangkit (Bukar et al., 2019). Sebaliknya, tinjauan dari perspektif termodinamika menemukan korelasi negatif apabila sistem dievaluasi berdasarkan rasio pemakaian bahan bakar spesifik (*Specific Fuel Consumption*); memburuknya efisiensi bahan bakar saat mesin beroperasi di beban rendah justru mengakibatkan peningkatan signifikan pada biaya produksi listrik per satuan kilowatt-jam, yang bermakna bahwa penurunan rasio konsumsi bahan bakar secara teknis akan menurunkan biaya operasi secara substansial (Mobarra et al., 2022). Melengkapi dinamika tersebut, pemodelan tekno-ekonomi membuktikan bahwa dominasi bahan bakar terhadap struktur biaya sejatinya dapat dikurangi; integrasi penyimpanan daya baterai dalam ekosistem hibrida dapat mengurangi ketergantungan pada generator konvensional dalam menyuplai beban jaringan, sehingga tren biaya operasi dapat diturunkan terlepas dari profil pemakaian bahan bakarnya (Halabi et al., 2017).

2.2.12 Produksi Energi Listrik Terhadap Pemakaian Bahan Bakar

Tinjauan literatur terkait relasi antara total produksi energi listrik dan tingkat pemakaian bahan bakar menunjukkan adanya dinamika yang sangat bergantung pada profil bauran teknologi pembangkitan. Dari sudut pandang korelasi positif, peningkatan produksi daya yang ditopang secara dominan oleh mesin mekanis konvensional terbukti secara empiris akan meningkatkan konsumsi sumber daya fosil harian; setiap lonjakan pemenuhan beban listrik mengharuskan generator beroperasi pada beban yang lebih tinggi, sehingga laju pembakaran bahan bakar diesel berbanding lurus dengan kuantitas energi yang disuplai ke dalam jaringan (Wali et al., 2023). Sebaliknya, dari perspektif korelasi negatif, investigasi analitis mengonfirmasi bahwa peningkatan agregat produksi energi listrik dapat menurunkan konsumsi bahan bakar secara signifikan apabila pasokan tersebut bertumpu pada tingginya penetrasi panel fotovoltaik; melimpahnya energi listrik dari PV tentu mengurangi jam operasional mesin pembakaran (Graça Gomes et al., 2021). Melengkapi temuan tersebut, penelitian terkini menunjukkan bahwa interdependensi kedua variabel ini dapat dihilangkan secara optimal melalui intervensi manajemen energi berbasis sistem penyimpanan energi baterai (BESS), yang bertindak krusial untuk menstabilkan pasokan sekaligus memastikan generator diesel hanya dihidupkan pada titik efisiensi puncaknya demi mengurangi konsumsi bahan bakar. (Damian et al., 2025).

2.2.13 Produksi Energi Listrik Terhadap Biaya Operasi Pembangkit

Tinjauan literatur terkait pengaruh produksi energi listrik terhadap biaya operasi menunjukkan adanya dinamika keekonomian yang amat bergantung pada bauran sumber dayanya. Dari sudut pandang pengaruh positif, eskalasi kuantitas listrik yang disuplai murni oleh mesin pembakaran internal terbukti berdampak langsung pada peningkatan biaya operasional; setiap tambahan kilowatt-jam yang diproduksi secara matematis menuntut penambahan konsumsi bahan bakar diesel yang langsung menaikkan pengeluaran harian sistem (Oviroh & Jen, 2018). Pada studi yang berlawanan, sejumlah peneliti menemukan adanya korelasi negatif apabila lonjakan produksi daya tersebut didominasi oleh penetrasi infrastruktur panel surya; tingginya produksi energi dari panel fotovoltaik terbukti mampu mengurangi kebutuhan operasional mesin diesel, yang pada gilirannya menurunkan total *operating expense* secara signifikan mengingat biaya

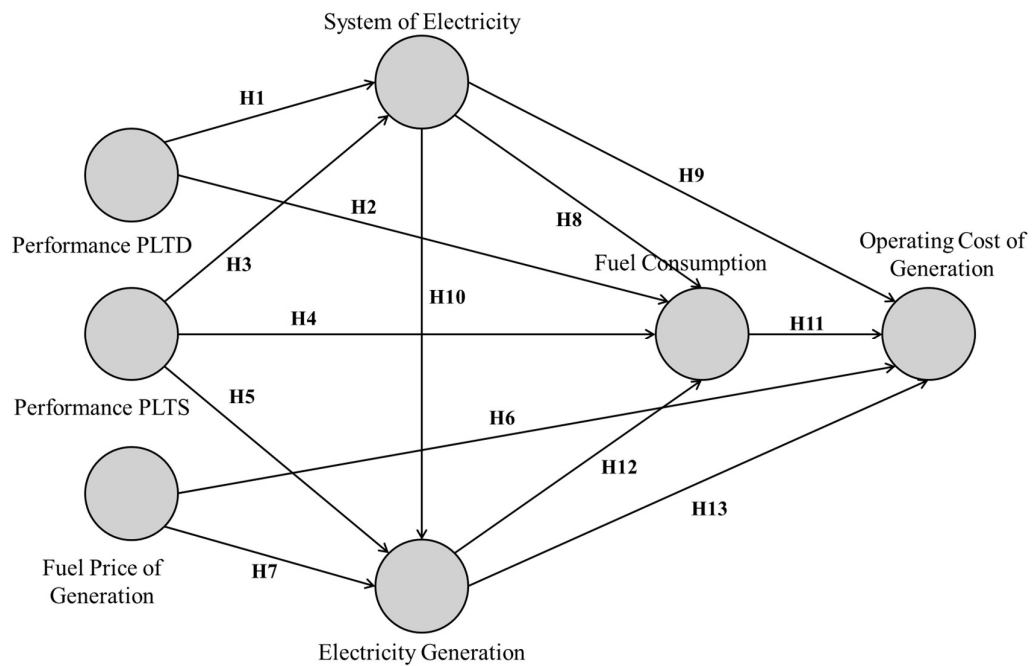
variabel marginal pembangkitan surya mendekati nol. (Oladigbolu et al., 2019). Melengkapi temuan tersebut, analisis tekno-ekonomi terkini menunjukkan bahwa interdependensi antara produksi daya dan biaya sejatinya dapat dikurangi; penerapan sistem penyimpanan energi baterai (BESS) mampu mengisolasi sistem dari inefisiensi, sehingga eskalasi produksi energi hibrida tidak lagi serta-merta memicu kenaikan biaya operasional (Al-falahi et al., 2017).

2.3 Hipotesis

Berdasarkan landasan teori dan permasalahan yang ada, diajukan hipotesis berikut:

- H1: Kinerja PLTD berpengaruh signifikan positif terhadap stabilitas Sistem Ketenagalistrikan.
- H2: Kinerja PLTD berpengaruh signifikan positif terhadap peningkatan pemakaian bahan bakar.
- H3: Kinerja PLTS berpengaruh signifikan positif terhadap keandalan sistem kelistrikan.
- H4: Kinerja PLTS berpengaruh signifikan negatif pemakaian bahan bakar.
- H5: Kinerja PLTS berpengaruh signifikan positif terhadap total produksi energi listrik.
- H6: Harga bahan bakar berpengaruh signifikan positif terhadap biaya operasi pembangkit.
- H7: Harga bahan bakar berpengaruh signifikan positif terhadap produksi energi listrik.
- H8: Kondisi sistem kelistrikan berpengaruh signifikan positif terhadap pemakaian bahan bakar.
- H9: Kondisi sistem kelistrikan berpengaruh signifikan positif terhadap biaya operasi pembangkit.
- H10: Kondisi sistem kelistrikan berpengaruh signifikan positif terhadap produksi energi listrik.

- H11: Pemakaian bahan bakar berpengaruh signifikan positif terhadap biaya operasi pembangkit.
- H12: Produksi energi listrik berpengaruh signifikan positif terhadap Pemakaian bahan bakar.
- H13: Produksi energi listrik berpengaruh signifikan negatif terhadap total biaya operasi pembangkit.



Gambar 2. 1 Model Struktur Penelitian