

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Dalam beberapa tahun terakhir, isu mengenai efisiensi energi dan efektivitas biaya operasional pada sistem pembangkit tenaga listrik berbasis mesin *diesel* menjadi perhatian utama di bidang teknik energi. Hal ini disebabkan oleh tingginya ketergantungan daerah-daerah terpencil dan kepulauan di Indonesia terhadap *Pembangkit Listrik Tenaga Diesel* (PLTD) sebagai sumber utama pasokan listrik. Sementara itu, di sisi lain, muncul tuntutan untuk menekan biaya operasional dan menurunkan emisi karbon melalui peningkatan efisiensi sistem serta penerapan metode analisis ekonomi yang lebih komprehensif seperti *Life Cycle Cost* (LCC).

Sejalan dengan perkembangan tersebut, berbagai studi telah dilakukan untuk menganalisis performa teknis, konsumsi bahan bakar, dan aspek keekonomian dari mesin *diesel* maupun sistem *hybrid* yang mengombinasikan tenaga fosil dengan energi terbarukan. Beragam penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk mengukur efisiensi energi, tetapi juga untuk memahami bagaimana strategi operasi dan pemeliharaan dapat memengaruhi total biaya selama umur pakai pembangkit.

Kajian terdahulu menunjukkan bahwa pendekatan analisis ekonomi seperti LCOE (*Levelized Cost of Energy*) dan LCC (*Life Cycle Cost*) semakin sering digunakan untuk mengevaluasi kinerja pembangkit dalam jangka panjang. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada simulasi sistem *hybrid* atau perbandingan antara pembangkit konvensional dan energi terbarukan, sementara analisis mendalam mengenai biaya siklus hidup mesin *diesel* berbasis data operasional aktual masih terbatas.

Adapun beberapa penelitian yang memiliki relevansi langsung dengan topik ini dijelaskan pada uraian berikut.

1. Amba dan Dalimi (2023)

Amba dan Dalimi meneliti sistem pembangkit *hybrid* yang menggabungkan tenaga surya dan diesel di Pulau Kawaluso, Sulawesi Utara. Dengan pendekatan ekonomi energi, penelitian mereka menunjukkan bahwa integrasi sistem tenaga surya dapat menurunkan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) secara signifikan dibandingkan

- dengan pembangkit diesel konvensional. Walaupun penelitian ini berbasis simulasi dan berfokus pada skala kecil, konsep ekonominya memberikan dasar analisis yang relevan untuk menilai efisiensi biaya pada sistem pembangkit diesel.
2. Syaukani, Ramdani, dan Wahid (2022)
Penelitian ini menganalisis sistem *hybrid* PLTS–PLTD menggunakan perangkat lunak *HOMER*. Hasilnya menunjukkan penghematan bahan bakar hingga 35% dibandingkan PLTD murni. Studi ini lebih menitikberatkan pada rancangan sistem energi terbarukan dan optimalisasi kombinasi daya daripada penghitungan biaya siklus hidup mesin diesel. Meskipun demikian, penelitian ini memberikan perspektif penting tentang strategi penghematan energi dan peningkatan efisiensi sistem pembangkitan.
 3. Kusuma dan Dalimi (2025)
Dalam penelitian berjudul “Analisa Teknologi dan Keekonomian *De-Dieselsiasi* PLTD Merawang”, Kusuma dan Dalimi meninjau peluang konversi dari sistem PLTD konvensional ke sistem tenaga surya dan angin. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem *hybrid* menghasilkan *Cost of Energy* (COE) lebih rendah dibandingkan PLTD murni. Relevansi penelitian ini dengan penelitian sekarang terletak pada aspek analisis keekonomian, meskipun penelitian tersebut tidak menelaah efisiensi teknis mesin diesel yang masih digunakan.
 4. Romy dan Trianto (2022)
Romy dan Trianto meneliti unjuk kerja mesin diesel dengan bahan bakar campuran *biodiesel* (B30) pada PLTD Selat Panjang. Hasil analisis menunjukkan peningkatan efisiensi energi dan pengurangan konsumsi bahan bakar spesifik. Penelitian ini penting karena mengaitkan karakteristik bahan bakar, performa mesin, dan dampaknya terhadap efisiensi sistem pembangkitan. Studi ini menjadi acuan dalam aspek teknis analisis konsumsi bahan bakar dan performa mesin diesel.
 5. Edy Susanto (2024)
Edy Susanto (2024) meneliti pengaruh harga bahan bakar fosil terhadap konsumsi listrik berbasis fosil dan energi terbarukan serta implikasinya terhadap produk domestik bruto (GDP) dan inflasi di kawasan Asia Pasifik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fluktuasi harga bahan bakar fosil berpengaruh signifikan terhadap konsumsi listrik dari pembangkit berbasis fosil, serta memiliki keterkaitan

dengan konsumsi listrik terbarukan dan kondisi ekonomi makro. Temuan ini menegaskan bahwa harga bahan bakar fosil merupakan faktor penting yang memengaruhi biaya pembangkitan listrik dan struktur konsumsi energi. Studi ini relevan sebagai landasan ekonomi energi yang mendukung analisis biaya jangka panjang pembangkit listrik berbasis diesel, khususnya dalam konteks evaluasi *Life Cycle Cost* (LCC)

Tabel 2.1 Ringkasan Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Utama	Relevansi dengan Penelitian Ini
1	Amba & Dalimi (2023)	<i>Economic Analysis of Hybrid Power Plant (Solar–Diesel) on Kawaluso Island, North Sulawesi</i>	Analisis ekonomi sistem <i>hybrid</i> menggunakan data simulasi	Sistem <i>hybrid</i> surya– <i>diesel</i> menurunkan LCOE dibanding <i>diesel</i> murni	Menjadi dasar analisis keekonomian pembangkit berbasis <i>diesel</i>
2	Syaukani, Ramdani & Wahid (2022)	<i>Simulation of Hybrid PLTS–PLTD System Using HOMER</i>	Simulasi <i>HOMER</i> untuk sistem <i>hybrid</i> PLTS–PLTD	Efisiensi meningkat dan konsumsi bahan bakar turun hingga 35%	Memberikan acuan dalam aspek efisiensi energi sistem pembangkit
3	Kusuma & Dalimi (2025)	<i>Analisa Teknologi dan Keekonomian De-Dieselsiasi PLTD Merawang</i>	Analisis teknis-ekonomis konversi sistem PLTD ke <i>hybrid</i>	COE sistem <i>hybrid</i> lebih rendah daripada PLTD konvensional	Menunjukkan pentingnya evaluasi keekonomian pembangkit <i>diesel</i>

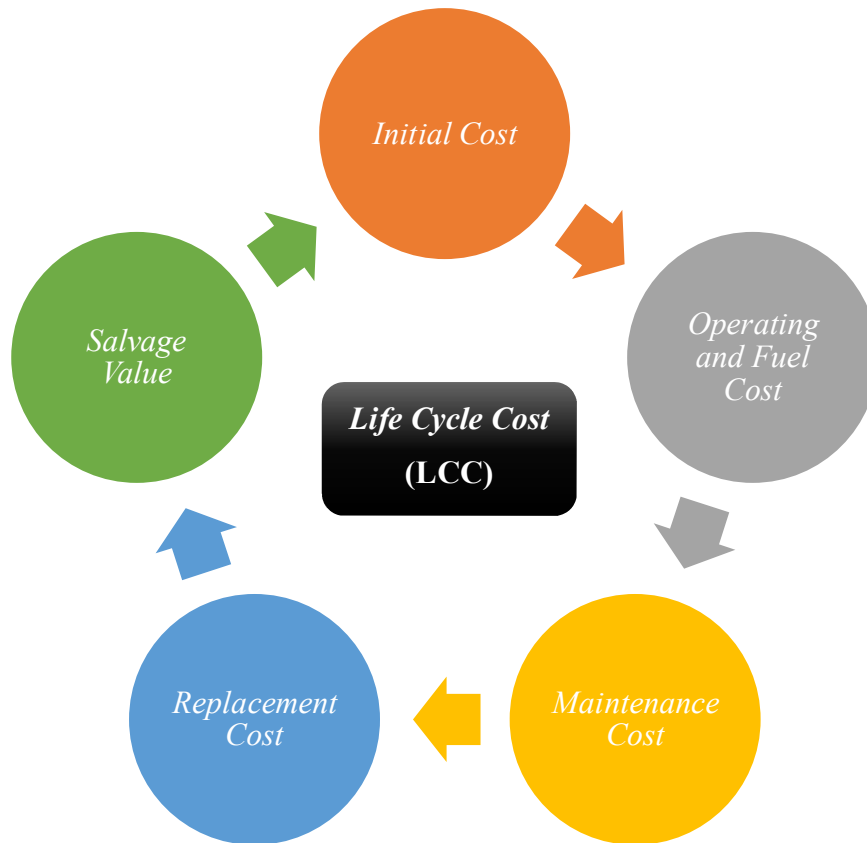
4	Romy & Trianto (2022)	<i>Energy Analysis of Diesel Engine with B30 at PLTD Selat Panjang</i>	Analisis unjuk kerja mesin <i>diesel</i> dengan bahan bakar B30	Peningkatan efisiensi dan penurunan konsumsi bahan bakar	Menjadi referensi teknis terkait hubungan efisiensi dan bahan bakar
		<i>Influence of Fossil Fuel Prices on Fossil and Renewable Electricity Consumptions, GDP, Inflation and Greenflation: A Case Study in the Asia Pacific Countries</i>	Analisis ekonomi energi menggunakan data time series dengan pendekatan Partial Least Squares–Structural Equation Modeling (PLS-SEM)	Harga bahan bakar fosil berpengaruh signifikan terhadap konsumsi listrik berbasis fosil dan terbarukan serta berdampak pada kondisi ekonomi makro, khususnya GDP dan inflasi	Menunjukkan bahwa harga bahan bakar fosil merupakan faktor dominan dalam biaya pembangkitan listrik, sehingga menjadi dasar ekonomi energi yang mendukung analisis Life Cycle Cost (LCC) pada pembangkit listrik tenaga diesel
5	Edy Susanto & Tri Wahyu Adi (2024)				

Dari hasil telaah terhadap kelima penelitian di atas, dapat disimpulkan bahwa mayoritas penelitian sebelumnya lebih menitik beratkan pada aspek perbandingan sistem energi (antara *diesel* dan *hybrid*) atau optimasi teknis efisiensi mesin, tetapi belum secara komprehensif mengkaji total biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost*) mesin diesel berbasis data aktual operasi.

Penelitian ini berbeda karena menggabungkan pendekatan teknis dan ekonomis untuk menganalisis biaya siklus hidup mesin *diesel* di PLTD Tenau Kupang, sehingga dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai efisiensi biaya operasional serta potensi strategi perawatan jangka panjang yang lebih efektif.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Konsep *Life Cycle Cost* (LCC)



Gambar 2.1 Life Cycle Cost Proses

Life Cycle Cost (LCC) merupakan pendekatan analisis ekonomi yang digunakan untuk menghitung total biaya kepemilikan suatu sistem atau peralatan selama masa pakainya. Metode ini tidak hanya memperhitungkan biaya awal pembelian atau investasi, tetapi juga seluruh biaya yang timbul akibat pengoperasian, pemeliharaan, perbaikan, hingga nilai sisa (*salvage value*) pada akhir umur peralatan.

Tujuan utama analisis LCC adalah untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai total pengeluaran selama siklus hidup suatu aset sehingga dapat ditentukan strategi pengelolaan yang paling efisien secara ekonomi. Dalam konteks sistem pembangkit *diesel*, LCC membantu mengidentifikasi komponen biaya dominan seperti konsumsi bahan bakar dan biaya *overhaul* mesin yang memiliki kontribusi besar terhadap total pengeluaran operasional.

Secara umum, nilai total biaya siklus hidup dapat dirumuskan sebagai:

$$LCC = C_i + C_o + C_m + C_r - S$$

Keterangan:

- C_i = Biaya investasi awal (*Initial Cost*)
- C_o = Biaya operasi dan bahan bakar (*Operating and Fuel Cost*)
- C_m = Biaya pemeliharaan dan perawatan (*Maintenance Cost*)
- C_r = Biaya penggantian komponen besar (*Replacement Cost*)
- S = Nilai sisa peralatan (*Salvage Value*)

Dalam praktiknya, setiap komponen biaya tersebut harus dinilai berdasarkan nilai waktu uang (*time value of money*) karena biaya yang dikeluarkan pada periode berbeda memiliki nilai ekonomi yang tidak sama. Oleh karena itu, diperlukan proses diskonto untuk menghitung nilai sekarang (*Present Worth*) dari seluruh pengeluaran selama umur peralatan dengan menggunakan tingkat suku bunga i .

Persamaan nilai sekarang total biaya dapat ditulis sebagai:

$$LCC = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}$$

Keterangan:

- C_t = Biaya pada tahun ke- t
- i = Tingkat diskonto
- n = Umur ekonomis mesin (tahun)

Analisis ini memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi pengaruh perubahan harga bahan bakar, efisiensi mesin, dan jadwal perawatan terhadap total biaya jangka panjang, serta menjadi dasar pengambilan keputusan investasi dan strategi operasional pembangkit.

2.2.2 Komponen-Komponen Life Cycle Cost

Menurut beberapa literatur teknik ekonomi energi, komponen utama dalam perhitungan LCC pada sistem pembangkit meliputi:

1. Biaya Investasi Awal (*Initial Cost/(Capital Expenditure / CAPEX)*)

Biaya investasi awal merupakan biaya yang dikeluarkan pada tahap awal sebelum sistem pembangkit beroperasi. Komponen ini meliputi biaya pengadaan mesin diesel dan generator, biaya instalasi, biaya konstruksi pendukung, serta biaya commissioning. Meskipun bersifat satu kali (*one-time cost*), CAPEX tetap menjadi bagian penting dalam analisis LCC karena berpengaruh terhadap total biaya kepemilikan selama umur pakai sistem.

2. Biaya Operasi (*Operating Expenditure / OPEX*)

Biaya yang timbul akibat kegiatan operasional harian, terutama konsumsi bahan bakar dan pelumas. Pada mesin *diesel*, komponen ini umumnya menjadi yang paling dominan karena harga bahan bakar yang tinggi dan kebutuhan operasi yang berkelanjutan.

3. Biaya Bahan Bakar (*Fuel Expenditure*)

Biaya bahan bakar merupakan komponen terbesar dalam struktur *Life Cycle Cost* pembangkit listrik tenaga diesel. Besarnya biaya ini dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar mesin, *specific fuel consumption* (SFC), jam operasi tahunan, serta harga bahan bakar solar yang bersifat fluktuatif. Oleh karena itu, perubahan efisiensi mesin dan harga bahan bakar akan berdampak langsung terhadap total biaya siklus hidup pembangkit.

4. Biaya Pemeliharaan dan *Overhaul* (*Maintenance & Overhaul Cost*)

Biaya ini mencakup perawatan rutin, penggantian suku cadang, serta kegiatan *overhaul* besar yang dilakukan secara berkala untuk menjaga performa mesin.

5. Biaya Penggantian Komponen (*Replacement Cost*)

Mengacu pada biaya yang timbul akibat penggantian komponen utama mesin yang mengalami keausan sebelum akhir umur peralatan, seperti *piston*, *liner*, atau *turbocharger*.

6. Nilai Sisa (*Salvage Value*)

Nilai ekonomi yang masih dimiliki mesin setelah masa pakai berakhir. Nilai ini dapat berupa harga jual kembali atau nilai residu dari komponen yang masih dapat dimanfaatkan.

7. Faktor Diskonto (*Discount Rate*)

Dalam analisis *Life Cycle Cost*, seluruh komponen biaya dianalisis dengan memperhitungkan nilai waktu uang (*time value of money*). Faktor diskonto digunakan untuk mengonversi biaya yang terjadi pada periode yang berbeda ke nilai sekarang (*present value*), sehingga seluruh biaya dapat dibandingkan secara setara. Pemilihan tingkat diskonto yang tepat sangat berpengaruh terhadap hasil perhitungan LCC dan interpretasi keekonomian sistem pembangkit.

2.2.3 Konsep Efisiensi Termal Mesin Diesel

Efisiensi termal (*thermal efficiency*) adalah ukuran kemampuan mesin dalam mengubah energi panas dari bahan bakar menjadi energi mekanik yang berguna. Dalam pembangkit listrik tenaga *diesel*, efisiensi termal sangat menentukan besarnya konsumsi bahan bakar per satuan energi listrik yang dihasilkan.

Secara umum, efisiensi termal mesin dapat dihitung dengan persamaan:

$$\eta_{th} = \frac{P_{out}}{\dot{m}_f \times LHV}$$

Keterangan:

- η_{th} = Efisiensi termal

- P_{out} = Daya keluaran mesin (kW)
- $\dot{m}_f$ = Laju konsumsi bahan bakar (kg/s)
- LHV = Nilai kalor bawah bahan bakar (*Lower Heating Value*)

Nilai efisiensi termal yang tinggi menunjukkan bahwa mesin bekerja secara optimal dengan pembakaran yang lebih sempurna dan kehilangan energi panas yang lebih sedikit. Sebaliknya, penurunan efisiensi dapat terjadi akibat penurunan kondisi komponen, sistem pembakaran yang tidak ideal, atau beban operasi yang terlalu rendah dari kapasitas nominalnya.

Efisiensi termal ini berkaitan langsung dengan *specific fuel consumption* (SFC), yaitu jumlah bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan satu kilowatt-jam energi listrik, yang dirumuskan sebagai:

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_{out}}$$

Semakin kecil nilai SFC, semakin efisien mesin dalam mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik.

2.2.4 Manajemen Pemeliharaan Mesin Diesel

Manajemen pemeliharaan merupakan faktor penting dalam menjaga performa mesin dan mengontrol biaya siklus hidup. Menurut prinsip rekayasa pemeliharaan, terdapat tiga jenis utama perawatan:

1. *Preventive Maintenance* – dilakukan secara terjadwal untuk mencegah kerusakan yang tidak diinginkan.
2. *Corrective Maintenance* – dilakukan ketika terjadi kerusakan pada komponen tertentu.
3. *Predictive Maintenance* – menggunakan data kondisi mesin (vibrasi, temperatur, tekanan) untuk memperkirakan kapan perawatan perlu dilakukan.

Frekuensi dan kualitas pemeliharaan berpengaruh langsung terhadap umur ekonomis mesin serta besarnya biaya *overhaul*. Dalam konteks LCC, manajemen

pemeliharaan yang baik dapat menurunkan total biaya jangka panjang meskipun biaya tahunan mungkin sedikit meningkat.

2.2.5 Konsep Ekonomi dalam Evaluasi Operasional Pembangkit

Evaluasi keekonomian sistem pembangkit tidak hanya mempertimbangkan besarnya biaya aktual yang dikeluarkan selama operasi, tetapi juga memperhitungkan nilai waktu uang (*time value of money*). Hal ini disebabkan karena nilai uang saat ini memiliki daya beli yang berbeda dibandingkan nilai uang di masa mendatang akibat adanya faktor inflasi, bunga, dan risiko investasi. Oleh karena itu, seluruh biaya yang terjadi sepanjang umur operasional pembangkit perlu dikonversi ke dalam nilai sekarang menggunakan konsep tingkat diskonto (*discount rate*).

Tingkat diskonto (i) berfungsi untuk menyesuaikan nilai ekonomi masa depan terhadap nilai pada saat ini. Dalam konteks analisis *Life Cycle Cost* (LCC), proses ini dilakukan agar seluruh komponen biaya yang terjadi pada periode berbeda dapat dibandingkan secara setara. Hubungan antara nilai sekarang dan nilai masa depan dapat dituliskan dalam persamaan:

$$PW = \frac{F}{(1 + i)^t}$$

Keterangan:

- PW = Nilai sekarang (*Present Worth*)
- F = Nilai masa depan (*Future Value*)
- i = Tingkat diskonto
- t = Periode waktu (tahun)

Dalam evaluasi ekonomi pembangkit, tingkat diskonto biasanya ditetapkan berdasarkan biaya modal (*cost of capital*) atau suku bunga pinjaman investasi. Nilai yang terlalu tinggi akan menyebabkan biaya di masa depan tampak lebih kecil, sedangkan nilai yang terlalu rendah dapat menyebabkan overestimasi terhadap biaya masa depan. Oleh sebab itu, pemilihan tingkat diskonto harus disesuaikan dengan kondisi ekonomi dan risiko proyek yang dihadapi.

Selain memperhitungkan nilai waktu uang, evaluasi ekonomi pembangkit juga umumnya menggunakan parameter *Net Present Cost* (NPC) dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) sebagai indikator kelayakan ekonomi.

- NPC merupakan total biaya diskonto dari seluruh pengeluaran selama masa pakai pembangkit, termasuk biaya investasi, bahan bakar, pemeliharaan, dan penggantian komponen.
- LCOE menunjukkan biaya produksi listrik per satuan energi (misalnya Rp/kWh) dengan memperhitungkan seluruh biaya selama umur pembangkit, yang dirumuskan sebagai:

$$LCOE = \frac{NPC_{total}}{E_{annual} \times n}$$

Keterangan:

- NPC_{total} = Total biaya diskonto selama umur pembangkit
- E_{annual} = Energi listrik yang dihasilkan setiap tahun (kWh)
- n = Umur ekonomis pembangkit (tahun)

Nilai LCOE yang rendah menunjukkan bahwa sistem pembangkit bekerja dengan biaya yang lebih efisien dan ekonomis dalam jangka panjang.

Selain itu, dalam analisis ekonomi sering dilakukan analisis sensitivitas untuk menilai dampak perubahan variabel utama terhadap hasil akhir perhitungan. Variabel tersebut dapat berupa harga bahan bakar, efisiensi mesin, tingkat diskonto, umur mesin, maupun frekuensi *overhaul*. Analisis ini penting karena kondisi lapangan sering kali tidak stabil dan setiap parameter memiliki potensi perubahan yang signifikan terhadap total biaya siklus hidup (LCC).

Dengan melakukan analisis sensitivitas, peneliti dapat menentukan skenario operasional paling optimal, misalnya dengan mencari kombinasi efisiensi mesin dan pola perawatan yang menghasilkan biaya siklus hidup paling rendah. Pendekatan ini membantu pengelola pembangkit dalam mengambil keputusan berbasis data (*data-driven decision*) untuk meningkatkan efisiensi biaya dan kinerja teknis mesin *diesel* secara berkelanjutan.

2.3 Kerangka Teori

Kerangka teori berfungsi sebagai dasar konseptual yang menjelaskan hubungan antara variabel-variabel utama yang dianalisis dalam penelitian. Dalam konteks analisis *Life Cycle Cost* (LCC) mesin diesel pada PLTD Tenau Kupang, teori-teori yang digunakan mencakup keterkaitan antara aspek teknis (efisiensi dan performa mesin) serta aspek ekonomis (biaya siklus hidup dan nilai diskonto).

2.3.1 Hubungan Efisiensi Termal dan Konsumsi Bahan Bakar

Efisiensi termal merupakan salah satu parameter terpenting dalam menilai kinerja mesin *diesel* karena menunjukkan kemampuan mesin dalam mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi mekanik yang berguna. Semakin tinggi efisiensi termal suatu mesin, semakin besar pula proporsi energi bahan bakar yang berhasil dikonversi menjadi daya poros (*brake power*), dan semakin sedikit energi yang terbuang dalam bentuk panas, gesekan, maupun emisi gas buang.

Secara umum, efisiensi termal mesin diesel dapat ditulis dalam bentuk persamaan:

$$\eta_{th} = \frac{P_{out}}{\dot{m}_f \times LHV}$$

Keterangan:

- η_{th} = Efisiensi termal (%),
- P_{out} = Daya keluaran efektif mesin (kW),
- $\dot{m}_f$ = Laju aliran massa bahan bakar (kg/s),
- LHV = Nilai kalor bawah bahan bakar (kJ/kg).

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa efisiensi termal berbanding terbalik dengan konsumsi bahan bakar spesifik atau *Specific Fuel Consumption* (SFC). Hubungan matematis antara efisiensi termal dan SFC dapat dinyatakan sebagai:

$$SFC = \frac{3600}{\eta_{th} \times LHV}$$

Semakin tinggi nilai efisiensi termal, maka semakin rendah nilai SFC, yang berarti mesin memerlukan bahan bakar lebih sedikit untuk menghasilkan energi

listrik per satuan waktu. Sebaliknya, penurunan efisiensi termal akibat keausan komponen, penurunan tekanan kompresi, atau sistem injeksi yang tidak optimal akan meningkatkan SFC dan mengakibatkan konsumsi bahan bakar yang lebih besar.

Faktor lain yang turut memengaruhi efisiensi termal adalah beban kerja mesin. Mesin *diesel* umumnya memiliki efisiensi *optimum* pada beban menengah hingga tinggi (sekitar 70–90% kapasitas nominal). Jika mesin beroperasi terlalu lama pada beban rendah, proses pembakaran menjadi tidak sempurna karena tekanan dan temperatur ruang bakar menurun, sehingga menghasilkan sisa bahan bakar yang tidak terbakar sempurna. Kondisi ini menyebabkan peningkatan konsumsi bahan bakar per kWh serta mempercepat keausan komponen mesin.

Selain kondisi beban, jenis bahan bakar juga memengaruhi nilai efisiensi termal. Bahan bakar dengan nilai kalor bawah (LHV) tinggi dan sifat pembakaran stabil seperti *solar* murni menghasilkan efisiensi termal yang lebih baik dibanding bahan bakar campuran yang memiliki kandungan oksigen tinggi seperti *biodiesel*. Namun, bahan bakar campuran seperti B30 sering digunakan untuk menekan emisi karbon meskipun konsumsi bahan bakarnya sedikit lebih besar.

Dalam konteks analisis *Life Cycle Cost* (LCC), perubahan efisiensi termal ini memiliki dampak ekonomi yang signifikan. Penurunan efisiensi sebesar 1–2% saja dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar tahunan secara substansial, terutama pada pembangkit berkapasitas besar dengan jam operasi tinggi seperti PLTD Tenau Kupang. Peningkatan konsumsi bahan bakar secara langsung menambah biaya operasional (*operating cost*), yang merupakan komponen dominan dalam total biaya siklus hidup mesin. Oleh karena itu, menjaga efisiensi termal mesin pada tingkat optimal melalui pengaturan beban operasi yang tepat, pemeliharaan sistem pembakaran, dan kalibrasi injektor bahan bakar menjadi langkah strategis untuk menekan biaya siklus hidup (LCC) pembangkit secara keseluruhan.

2.3.2 Hubungan Kinerja Operasional dan Biaya Siklus Hidup

Kinerja operasional mesin *diesel* merupakan cerminan dari kemampuan sistem pembangkit dalam menghasilkan daya listrik secara stabil, efisien, dan andal (*reliable*) selama periode operasi yang panjang. Parameter kinerja operasional biasanya diukur melalui stabilitas daya keluaran, efisiensi termal, tingkat konsumsi bahan bakar, serta frekuensi terjadinya gangguan atau *downtime*.

Mesin *diesel* yang memiliki performa operasi baik akan menghasilkan daya konstan pada konsumsi bahan bakar *minimum* dan memerlukan waktu perawatan yang lebih sedikit. Sebaliknya, ketika performa menurun akibat keausan komponen mekanis, menurunnya sistem pelumasan, degradasi sistem injeksi bahan bakar, atau berkurangnya kompresi silinder maka konsumsi bahan bakar akan meningkat, daya efektif menurun, dan frekuensi perawatan menjadi lebih sering. Kondisi tersebut akan memengaruhi biaya operasional secara langsung maupun tidak langsung.

Dalam konteks analisis *Life Cycle Cost* (LCC), penurunan kinerja operasional akan menambah dua komponen biaya utama, yaitu:

1. Biaya Operasi (*Operating Cost*)

Peningkatan konsumsi bahan bakar sebagai akibat dari penurunan efisiensi akan meningkatkan biaya operasi tahunan. Pada pembangkit *diesel* skala besar seperti PLTD Tenau Kupang, bahan bakar dapat menyumbang hingga lebih dari 60–70% dari total biaya operasional tahunan. Oleh karena itu, fluktuasi kecil dalam efisiensi dapat menimbulkan dampak ekonomi yang signifikan terhadap nilai total LCC.

2. Biaya Pemeliharaan (*Maintenance Cost*)

Kinerja mesin yang menurun sering memerlukan perawatan lebih intensif, baik dalam bentuk perawatan preventif, korektif, maupun *overhaul* besar. Frekuensi *overhaul* yang meningkat berarti tambahan biaya penggantian suku cadang, tenaga kerja, serta waktu henti produksi (*downtime*). Setiap jam berhentinya operasi pembangkit dapat menimbulkan potensi kerugian akibat hilangnya energi listrik yang seharusnya dihasilkan.

Kedua komponen biaya tersebut (*operating dan maintenance cost*) saling berkaitan. Mesin yang beroperasi dengan kinerja optimal tidak hanya menghemat bahan bakar tetapi juga mengurangi tingkat keausan komponen *internal*, sehingga memperpanjang umur pakai (*service life*) mesin. Dalam jangka panjang, kondisi ini berdampak positif terhadap penurunan total *Life Cycle Cost*, karena biaya perawatan, penggantian komponen, dan kehilangan produksi dapat ditekan.

2.3.3 Hubungan Antara Perawatan dan Umur Ekonomis Mesin

Frekuensi dan kualitas perawatan memegang peranan penting dalam menentukan umur ekonomis mesin. Pemeliharaan yang dilakukan secara preventif dan tepat waktu mampu memperpanjang umur pakai mesin, menekan frekuensi *overhaul*, serta mengurangi biaya penggantian komponen besar (*replacement cost*). Sebaliknya, jika pemeliharaan dilakukan secara reaktif atau setelah kerusakan terjadi, maka total LCC akan meningkat karena tingginya biaya perbaikan mendadak dan *downtime* operasional [15].

2.3.4 Faktor Ekonomi dan Nilai Waktu Uang

Dalam analisis *Life Cycle Cost* (LCC), seluruh komponen biaya yang terjadi selama masa pakai mesin perlu disetarakan ke dalam satuan nilai ekonomi yang sama agar dapat dibandingkan secara objektif. Proses penyetaraan ini dilakukan dengan cara mengonversi setiap biaya di masa depan menjadi nilai sekarang (*present worth*) menggunakan prinsip nilai waktu uang (*time value of money*).

Konsep nilai waktu uang menyatakan bahwa nilai uang saat ini lebih berharga daripada jumlah uang yang sama di masa mendatang, karena uang yang tersedia sekarang dapat diinvestasikan dan menghasilkan keuntungan (bunga) di masa depan. Oleh karena itu, ketika melakukan evaluasi biaya jangka Panjang seperti investasi mesin *diesel*, biaya bahan bakar tahunan, atau biaya *overhaul* periodic setiap pengeluaran di masa mendatang harus didiskontokan untuk mencerminkan nilainya terhadap waktu sekarang.

Secara matematis, hubungan antara nilai masa depan (*future value, F*) dan nilai sekarang (*present worth, PW*) dapat dituliskan sebagai:

$$PW = \frac{F}{(1 + i)^t}$$

Keterangan:

- PW = Nilai sekarang (*Present Worth*)
- F = Nilai masa depan (*Future Value*)
- i = Tingkat diskonto (*discount rate*)
- t = Periode waktu (tahun)

Nilai tingkat diskonto (i) merupakan faktor penting dalam analisis ekonomi. Nilai ini dapat merepresentasikan biaya modal (*cost of capital*), tingkat suku bunga bank, inflasi, maupun tingkat risiko proyek. Apabila tingkat diskonto yang digunakan terlalu tinggi, maka nilai biaya masa depan akan tampak kecil, sehingga proyek terlihat lebih menguntungkan secara jangka pendek. Sebaliknya, apabila tingkat diskonto terlalu rendah, nilai biaya di masa depan akan tampak besar dan dapat menurunkan kelayakan ekonomi proyek. Oleh sebab itu, pemilihan tingkat diskonto yang tepat harus mempertimbangkan stabilitas ekonomi, kebijakan energi nasional, serta profil risiko proyek pembangkit.

2.3.5 Keterkaitan Aspek Teknis dan Ekonomis dalam Analisis LCC

Analisis *Life Cycle Cost* (LCC) merupakan pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan aspek teknis dan aspek ekonomis untuk menilai kinerja serta efisiensi biaya suatu sistem selama masa pakainya. Kedua aspek ini tidak dapat dipisahkan karena kinerja teknis mesin secara langsung memengaruhi besarnya pengeluaran ekonomi, sedangkan kondisi ekonomi juga menentukan strategi teknis yang dapat diterapkan dalam operasi dan pemeliharaan mesin.

Dari sisi aspek teknis, faktor yang paling berpengaruh terhadap biaya operasional pembangkit adalah efisiensi termal mesin, kondisi beban operasi, serta frekuensi dan kualitas pemeliharaan. Efisiensi termal yang tinggi menandakan bahwa mesin mampu mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik secara *optimal*, sehingga konsumsi bahan bakar per kWh dapat ditekan. Sebaliknya, penurunan efisiensi akibat keausan komponen, tekanan kompresi rendah, atau pembakaran yang tidak sempurna akan meningkatkan konsumsi bahan bakar dan

mempercepat kebutuhan *overhaul*. Kondisi ini menyebabkan naiknya *operating cost* dan *maintenance cost*, dua komponen utama dalam total LCC.

Sementara itu, beban operasi mesin diesel juga memegang peranan penting. Mesin yang beroperasi terlalu lama pada beban rendah cenderung memiliki efisiensi rendah karena tekanan ruang bakar dan temperatur kerja tidak ideal. Hal ini meningkatkan *specific fuel consumption* (SFC) dan mempercepat degradasi pelumas, yang akhirnya menambah biaya perawatan. Sebaliknya, operasi pada beban optimal (70–90% kapasitas nominal) umumnya memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi energi dan keausan komponen.

Dari sisi aspek ekonomis, biaya bahan bakar dan pemeliharaan merupakan kontributor terbesar terhadap total *Life Cycle Cost*. Fluktuasi harga bahan bakar global dan kebijakan energi domestik (seperti penerapan *biodiesel*) dapat memengaruhi biaya operasional tahunan secara signifikan. Selain itu, perencanaan pemeliharaan yang tidak efisien dapat memperpendek umur mesin dan meningkatkan biaya penggantian komponen besar (*replacement cost*). Dengan demikian, analisis ekonomi tidak hanya berfokus pada penghitungan biaya, tetapi juga pada pengendalian faktor teknis yang menjadi penyebab utama perubahan biaya tersebut.

Keterkaitan antara aspek teknis dan ekonomis dapat digambarkan melalui hubungan sebab-akibat berikut:

- Penurunan efisiensi mesin → peningkatan konsumsi bahan bakar → naiknya *operating cost*.
- Frekuensi pemeliharaan yang tidak teratur → peningkatan *downtime* dan *maintenance cost* → penurunan produktivitas pembangkit.
- Pengelolaan beban operasi yang tepat → efisiensi meningkat → penurunan total *Life Cycle Cost*.

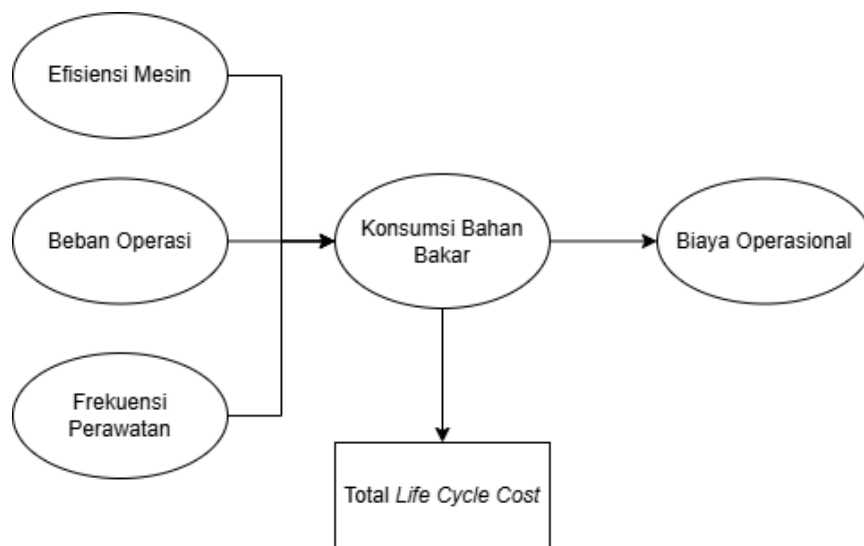
Dalam konteks PLTD Tenau Kupang, integrasi antara analisis teknis dan ekonomis sangat penting untuk menentukan strategi operasional yang efisien. Melalui analisis LCC, operator dapat mengidentifikasi area yang paling

memengaruhi biaya jangka panjang, seperti konsumsi bahan bakar dan frekuensi *overhaul*, kemudian merumuskan kebijakan teknis untuk memperbaikinya.

Dengan demikian, *Life Cycle Cost Analysis* berperan sebagai alat pengambilan keputusan terpadu yang menghubungkan performa teknis mesin dengan konsekuensi ekonominya. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih realistis terhadap efisiensi sistem pembangkit, tidak hanya dari segi performa energi, tetapi juga dari perspektif keekonomian dan keberlanjutan operasional. Melalui sinergi antara kedua aspek tersebut, diharapkan pengelolaan PLTD dapat mencapai efisiensi teknis yang tinggi sekaligus biaya operasional yang *minimum* sepanjang umur mesin *diesel*.

2.3.6 Model Konseptual Penelitian

Berdasarkan uraian di atas, hubungan antarvariabel dalam penelitian ini dapat digambarkan melalui model konseptual sebagai berikut:



Gambar 2. 2 Model Diagram Konseptual Penelitian

Model tersebut menjelaskan bahwa efisiensi mesin, beban operasi, dan perawatan merupakan variabel yang memengaruhi konsumsi bahan bakar serta biaya pemeliharaan, yang pada akhirnya menentukan nilai total *Life Cycle Cost* (LCC).

2.4 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran berfungsi sebagai panduan logis yang menjelaskan bagaimana teori-teori, konsep-konsep, serta hasil penelitian terdahulu diintegrasikan untuk mencapai tujuan penelitian. Dalam konteks penelitian ini, kerangka pemikiran disusun untuk menjelaskan hubungan sebab-akibat antara efisiensi teknis mesin *diesel*, biaya operasional, dan nilai total *Life Cycle Cost* (LCC) pada sistem pembangkit listrik tenaga *diesel* di PLTD Tenau Kupang.

Permasalahan utama yang menjadi dasar penelitian adalah tingginya biaya operasional pembangkit akibat konsumsi bahan bakar yang besar dan frekuensi perawatan yang tinggi. Kondisi ini seringkali diperburuk oleh penurunan efisiensi mesin akibat faktor usia peralatan dan beban kerja yang tidak ideal. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan analisis yang tidak hanya menilai performa teknis mesin, tetapi juga mengukur dampak ekonominya secara menyeluruh sepanjang umur operasional dan pendekatan tersebut diwujudkan melalui metode *Life Cycle Cost* (LCC).

Dalam penelitian ini, analisis LCC digunakan untuk menilai total biaya yang timbul selama masa pakai mesin *diesel*, meliputi biaya investasi awal, biaya operasi dan bahan bakar, biaya perawatan, biaya penggantian komponen, hingga nilai sisa mesin pada akhir umur ekonomisnya. Nilai total LCC ini kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi komponen biaya yang paling dominan serta mengevaluasi pengaruh efisiensi mesin terhadap besarnya biaya siklus hidup.

Selanjutnya, dilakukan analisis sensitivitas untuk menilai seberapa besar perubahan parameter utama seperti harga bahan bakar, efisiensi mesin, tingkat diskonto, dan frekuensi *overhaul* mempengaruhi total biaya LCC. Dengan cara ini, penelitian dapat memberikan gambaran yang lebih akurat tentang faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap efisiensi biaya operasional mesin diesel.

2.4.1 Alur Pemikiran Penelitian

Secara garis besar, kerangka pemikiran penelitian ini dapat dijelaskan melalui tahapan berikut:

1. Identifikasi Masalah

Menemukan permasalahan utama berupa tingginya biaya operasional PLTD Tenau akibat konsumsi bahan bakar yang besar dan penurunan efisiensi mesin.

2. Kajian Teoritis dan Studi Terdahulu

Mengumpulkan teori dasar mengenai *Life Cycle Cost* (LCC), efisiensi termal mesin *diesel*, serta hasil penelitian terdahulu sebagai dasar penyusunan model analisis.

3. Pengumpulan Data Operasional

Menggunakan data aktual dari PLTD Tenau Kupang seperti konsumsi bahan bakar, jam kerja mesin, jadwal perawatan, dan biaya *overhaul*.

4. Analisis *Life Cycle Cost* (LCC)

Menghitung total biaya siklus hidup mesin *diesel* berdasarkan komponen biaya utama dan mengonversinya ke nilai sekarang menggunakan tingkat diskonto tertentu.

5. Analisis Sensitivitas

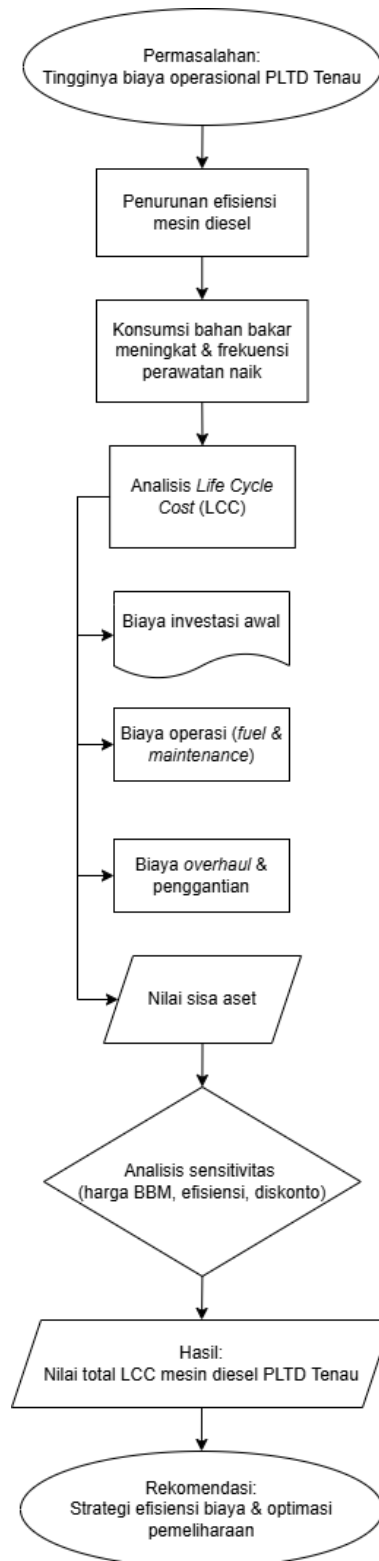
Menganalisis pengaruh perubahan parameter seperti harga bahan bakar, efisiensi mesin, dan tingkat bunga terhadap total LCC.

6. Evaluasi dan Rekomendasi

Menarik kesimpulan mengenai efisiensi biaya operasional dan memberikan rekomendasi strategi perawatan serta optimasi operasi mesin untuk menurunkan LCC jangka panjang.

2.4.2 Diagram Alur Kerangka Pemikiran

Berikut gambaran konseptual hubungan antar komponen dalam penelitian:



Gambar 2. 3 Diagram Alur Kerangka Pemikiran

2.4.3 Hubungan Antarvariabel Penelitian

Berdasarkan kerangka di atas, hubungan antarvariabel utama dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Efisiensi Mesin *Diesel*: berpengaruh langsung terhadap konsumsi bahan bakar dan biaya operasional.
- Beban Operasi dan Pola Pemeliharaan: memengaruhi umur pakai mesin dan frekuensi *overhaul*.
- Parameter Ekonomi (harga bahan bakar, tingkat diskonto): memengaruhi nilai akhir total LCC.

Dengan memahami keterkaitan ini, penelitian dapat menilai tidak hanya seberapa besar biaya operasional yang terjadi, tetapi juga bagaimana peningkatan efisiensi dan strategi pemeliharaan dapat menurunkan total biaya siklus hidup mesin diesel secara berkelanjutan.