

Analisis *Life Cycle Cost* (LCC) Mesin Diesel pada PLTD Tenau Kupang untuk Evaluasi Efisiensi Biaya dan Manajemen Operasional

Dwi Murdani*, Edy Susanto

Institut Teknologi PLN, Indonesia

Email: dwimurdani0@gmail.com*

Keywords:

Life Cycle Cost; Diesel Engine; Power Plant; Operational Efficiency

Abstract

Diesel Power Plants (PLTD) remain an essential component of electricity supply, particularly in island regions with limited transmission infrastructure. However, high fuel costs, maintenance requirements, and declining engine efficiency due to operational aging represent major challenges in achieving sustainable PLTD management. This study aims to analyze the Life Cycle Cost (LCC) of diesel engines at Tenau Kupang Diesel Power Plant and evaluate the factors affecting operational cost efficiency. A quantitative approach was applied using LCC analysis based on actual operational data from 2020–2025, including engine operating hours, fuel consumption, electricity production, maintenance costs, and Specific Fuel Consumption (SFC) performance indicators. Sensitivity analysis was conducted to evaluate the effects of fuel price changes, engine efficiency variations, discount rates, and overhaul costs on the total life cycle cost. The results indicate that the total LCC of three diesel engine units at Tenau Kupang reached approximately IDR 31.55 billion. The Caterpillar engine contributed the largest proportion of LCC at 59.2%, while fuel costs represented the dominant component for MAK engines, accounting for approximately 47–51% of total costs. Changes in fuel prices and SFC values were identified as the most sensitive parameters affecting LCC variations. This study concludes that improving fuel efficiency, optimizing engine loading, and implementing condition-based maintenance strategies are essential approaches to reducing PLTD life cycle costs and improving operational sustainability.

Kata kunci:

Life Cycle Cost; Mesin Diesel; PLTD; Efisiensi Operasional

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) masih menjadi komponen penting dalam penyediaan energi listrik, khususnya di wilayah kepulauan dengan keterbatasan infrastruktur transmisi. Namun, tingginya biaya bahan bakar, pemeliharaan, dan penurunan efisiensi mesin akibat umur operasi menjadi tantangan utama dalam pengelolaan PLTD secara berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis *Life Cycle Cost* (LCC) mesin diesel pada PLTD Tenau Kupang serta mengevaluasi faktor yang memengaruhi efisiensi biaya operasional pembangkit. Metode penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis LCC berdasarkan data operasional aktual periode 2020–2025 yang mencakup jam operasi mesin, konsumsi bahan bakar, produksi energi listrik, biaya pemeliharaan, dan parameter efisiensi *Specific Fuel Consumption* (SFC). Analisis sensitivitas

dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan harga bahan bakar, efisiensi mesin, tingkat diskonto, dan biaya overhaul terhadap total biaya siklus hidup. Hasil penelitian menunjukkan bahwa total LCC tiga unit mesin diesel PLTD Tenau Kupang mencapai sekitar Rp31,55 miliar. Mesin Caterpillar memiliki kontribusi LCC terbesar sebesar 59,2%, sedangkan biaya bahan bakar menjadi komponen dominan pada mesin MAK dengan kontribusi sekitar 47–51%. Perubahan harga bahan bakar dan nilai SFC terbukti menjadi faktor paling sensitif terhadap perubahan nilai LCC. Penelitian ini menyimpulkan bahwa peningkatan efisiensi bahan bakar, optimalisasi pembebanan mesin, dan penerapan pemeliharaan berbasis kondisi menjadi strategi utama dalam menekan biaya siklus hidup PLTD.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga *Diesel* (PLTD) masih menjadi salah satu tulang punggung penyediaan energi listrik di wilayah kepulauan Indonesia, khususnya di Provinsi Nusa Tenggara Timur. Kondisi geografis yang tersebar serta keterbatasan infrastruktur transmisi menjadikan PLTD sebagai solusi pembangkitan yang relatif andal dan fleksibel (Pulau & Iyang, 2025; Susanto, Sunanda, & Kurniawan, 2020). Salah satu pembangkit yang berperan penting dalam sistem kelistrikan wilayah tersebut adalah PLTD Tenau Kupang, yang menyuplai kebutuhan listrik Kota Kupang dan sekitarnya (W Hayatullah, Pratama, Yakut, & Rachman, 2021; X Ren, Jing, & Zhang, 2023; X Zhao, Gui, Chen, Fan, & Pan, 2024). Namun demikian, ketergantungan pada mesin diesel menghadirkan tantangan utama berupa tingginya biaya operasional, terutama yang bersumber dari konsumsi bahan bakar dan biaya pemeliharaan mesin (Ali & Nugroho, 2017; Widagdo, 2013).

Secara umum, mesin *diesel* memiliki keunggulan dari sisi keandalan dan kemudahan pengoperasian, tetapi di sisi lain memiliki biaya siklus hidup yang relatif tinggi. Biaya bahan bakar, biaya perawatan rutin, serta kebutuhan *overhaul* secara periodik menjadi komponen dominan dalam struktur biaya operasional PLTD (G Casella, Monferdini, Bigliardi, & Bottani, 2025; Gavaldà et al., 2022; Li, Wang, Li, Zhang, & Zhang, 2022; Zou, Huang, Chen, Wu, & Wen, 2021). Selain itu, penurunan efisiensi mesin akibat umur operasi, kondisi beban yang tidak optimal, serta degradasi komponen mekanis dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar dan memperbesar biaya jangka panjang (Rofiq Salam & Widodo, 2024; Romy & Trianto, 2022; Witanto, Amsah, Zukri, Nuramal, & Rosa, 2023). Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan evaluasi yang tidak hanya menilai biaya operasional tahunan, tetapi juga mampu menggambarkan total biaya selama umur pakai mesin.

Pendekatan *Life Cycle Cost* (LCC) merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk menghitung total biaya kepemilikan dan pengoperasian suatu sistem selama masa pakainya, meliputi biaya investasi awal, biaya operasi dan bahan bakar, biaya pemeliharaan, biaya penggantian komponen, hingga nilai sisa pada akhir umur ekonomis (Altaf, Alaloul, Musarat, & Qureshi, 2023; Luerssen, Gandhi, Reindl, Sekhar, & Cheong, 2020). Sejumlah penelitian terdahulu telah menerapkan analisis ekonomi pada

pembangkit diesel maupun sistem *hybrid diesel*–energi terbarukan. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada studi simulasi atau perbandingan sistem, sementara kajian LCC berbasis data operasional aktual mesin *diesel* eksisting dalam skala pembangkit relatif terbatas (Ilham Amba & Dalimi, 2023; Riayatsyah, Geumpana, Fattah, & Mahlia, 2022).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan pendekatan analisis ekonomi untuk mengevaluasi kinerja dan biaya sistem pembangkit berbasis diesel. Penelitian Widagdo menunjukkan bahwa optimasi pola pembebanan mesin diesel memiliki pengaruh terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar dan biaya operasional pembangkit. Selanjutnya, penelitian Ali dan Nugroho membuktikan bahwa karakteristik bahan bakar berpengaruh terhadap konsumsi bahan bakar serta performa mesin diesel pembangkit. Kajian Romy dan Trianto mengenai analisis energi mesin diesel pada PLTD Selat Panjang juga menunjukkan bahwa efisiensi mesin dipengaruhi oleh kondisi operasi dan kualitas proses pembakaran. Selain itu, penelitian terkait integrasi sistem *hybrid diesel*–energi terbarukan oleh Riayatsyah et al., serta Amba dan Dalimi menggunakan pendekatan analisis tekno-ekonomi untuk menentukan kelayakan sistem pembangkit pada wilayah terpencil. Penelitian-penelitian tersebut memberikan kontribusi penting dalam memahami aspek teknis dan ekonomi pembangkit diesel, tetapi sebagian besar masih berfokus pada optimasi operasi, simulasi sistem, atau perbandingan alternatif teknologi energi. Kajian yang secara khusus mengevaluasi total biaya siklus hidup mesin diesel eksisting berdasarkan data operasional aktual pembangkit masih relatif terbatas.

Pendekatan *Life Cycle Cost* (LCC) menjadi salah satu metode yang relevan untuk menjawab kebutuhan evaluasi ekonomi aset pembangkit karena mampu menghitung seluruh komponen biaya selama umur ekonomis suatu sistem. Berbeda dengan analisis biaya konvensional yang hanya mempertimbangkan pengeluaran operasional dalam periode tertentu, LCC mencakup biaya investasi awal, biaya operasi, biaya bahan bakar, biaya pemeliharaan, biaya penggantian komponen, biaya overhaul, hingga nilai sisa aset. Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan metode LCC pada berbagai sektor teknologi, seperti penelitian Luerksen et al. yang menggunakan LCC untuk mengevaluasi sistem energi terintegrasi, serta Zhao et al. yang menerapkan pendekatan biaya siklus hidup untuk memperkirakan biaya aset berdasarkan tingkat kegagalan komponen. Namun, penerapan metode LCC pada mesin diesel pembangkit dengan menggunakan data historis operasi aktual, terutama pada pembangkit diesel wilayah kepulauan Indonesia, masih belum banyak dikaji secara mendalam. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (*research gap*) berupa keterbatasan studi yang menghubungkan antara performa teknis mesin, konsumsi bahan bakar, biaya pemeliharaan, serta sensitivitas parameter ekonomi dalam satu kerangka evaluasi biaya siklus hidup yang komprehensif.

Kesenjangan tersebut menjadi semakin penting karena pengelolaan pembangkit diesel tidak hanya membutuhkan informasi mengenai kemampuan menghasilkan energi, tetapi juga membutuhkan strategi pengendalian biaya jangka panjang. Fluktuasi harga bahan bakar, peningkatan jam operasi mesin, serta perubahan tingkat efisiensi akibat

degradasi komponen dapat memberikan dampak signifikan terhadap biaya operasional pembangkit. Tanpa evaluasi berbasis siklus hidup, pengelola pembangkit berpotensi hanya melakukan keputusan berdasarkan biaya jangka pendek tanpa mempertimbangkan konsekuensi ekonomi selama umur aset. Pada konteks PLTD Tenau Kupang, peningkatan kebutuhan beban listrik dan pengoperasian beberapa unit mesin dengan karakteristik berbeda, yaitu mesin MAK dan Caterpillar, membutuhkan analisis yang mampu mengidentifikasi unit dengan kontribusi biaya terbesar serta faktor dominan yang memengaruhi total biaya. Oleh karena itu, penelitian mengenai LCC mesin diesel menjadi penting sebagai instrumen pendukung pengambilan keputusan dalam strategi pemeliharaan, pengoperasian mesin, dan perencanaan efisiensi biaya pembangkitan.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan analisis *Life Cycle Cost* terhadap mesin diesel PLTD Tenau Kupang dengan menggunakan data operasional aktual periode 2020–2025, yang mencakup parameter jam operasi, konsumsi bahan bakar, produksi energi listrik, biaya pemeliharaan, serta performa mesin berdasarkan nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC). Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang banyak menggunakan pendekatan simulasi atau analisis kelayakan sistem pembangkit alternatif, penelitian ini memberikan evaluasi berbasis kondisi nyata aset pembangkit yang telah beroperasi. Selain menghitung nilai total LCC setiap unit mesin, penelitian ini juga mengintegrasikan analisis sensitivitas terhadap perubahan harga bahan bakar, efisiensi mesin, tingkat diskonto, dan biaya overhaul. Pendekatan tersebut memungkinkan identifikasi faktor paling dominan yang memengaruhi biaya siklus hidup serta memberikan gambaran yang lebih aplikatif bagi pengelola pembangkit dalam menentukan strategi efisiensi operasional.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis *Life Cycle Cost* mesin diesel pada PLTD Tenau Kupang dengan mengevaluasi struktur biaya selama masa operasi, mengidentifikasi komponen biaya yang paling dominan, serta menganalisis hubungan antara efisiensi operasional mesin dan total biaya siklus hidup. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat sensitivitas nilai LCC terhadap perubahan parameter utama seperti harga bahan bakar dan nilai SFC sehingga dapat diketahui faktor yang paling berpengaruh terhadap keberlanjutan ekonomi operasi pembangkit. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kondisi ekonomi aset mesin diesel serta mendukung proses pengambilan keputusan berbasis data dalam pengelolaan pembangkit listrik.

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan manfaat secara akademik maupun praktis. Secara akademik, penelitian ini dapat memperkaya kajian mengenai penerapan metode *Life Cycle Cost* pada sektor energi, khususnya pembangkit diesel yang beroperasi pada wilayah dengan karakteristik sistem kelistrikan terbatas. Secara praktis, hasil penelitian dapat menjadi referensi bagi pengelola PLTD Tenau Kupang dan pihak terkait dalam merancang strategi pengoperasian mesin, menentukan prioritas pemeliharaan, serta mengoptimalkan konsumsi bahan bakar untuk menekan biaya siklus hidup pembangkit. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan kajian lanjutan dengan

memasukkan aspek emisi karbon, keandalan sistem, maupun skenario integrasi energi terbarukan sehingga pengelolaan pembangkit diesel dapat dilakukan secara lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian dan Data Operasional

Penelitian ini dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga *Diesel* (PLTD) Tenau Kupang yang berlokasi di Kota Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Objek penelitian difokuskan pada mesin diesel utama (*prime mover*) yang digunakan sebagai penggerak generator listrik. Data yang digunakan merupakan data operasional aktual yang diperoleh dari dokumen internal pembangkit, meliputi jam operasi mesin, konsumsi bahan bakar, produksi energi listrik, serta data pemeliharaan dan *overhaul* mesin. Data tersebut digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kinerja operasional dan biaya siklus hidup mesin *diesel*.

Metode Analisis *Life Cycle Cost*

Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Life Cycle Cost* (LCC), yaitu pendekatan ekonomi untuk menghitung total biaya kepemilikan dan pengoperasian mesin *diesel* selama umur pakainya. Komponen biaya yang dianalisis meliputi biaya investasi awal, biaya operasi dan bahan bakar, biaya pemeliharaan dan *overhaul*, biaya penggantian komponen, serta nilai sisa mesin pada akhir umur ekonomis (Xinyue Zhao, Gui, Chen, Fan, & Pan, 2024). Secara umum, perhitungan LCC dirumuskan sebagai:

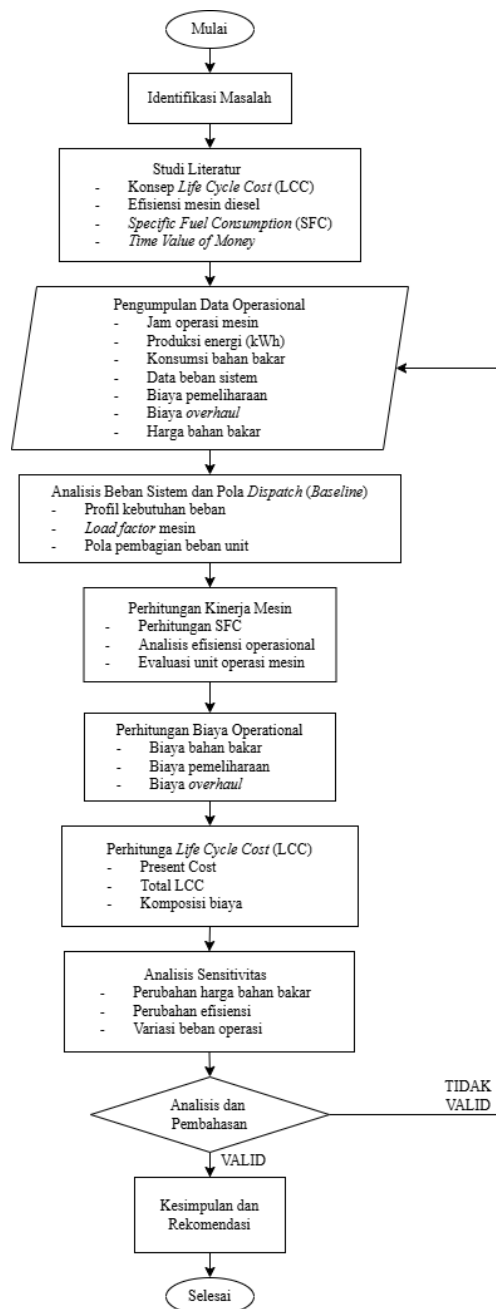
$$LCC = C_i + C_o + C_m + C_r - S$$

Seluruh komponen biaya dianalisis dengan mempertimbangkan nilai waktu uang (*time value of money*) melalui pendekatan *present cost* untuk memperoleh nilai biaya yang setara secara ekonomi.

Analisis Efisiensi Operasional dan Sensitivitas

Efisiensi operasional mesin diesel dianalisis menggunakan parameter *Specific Fuel Consumption* (SFC), yang diperoleh dari perbandingan antara konsumsi bahan bakar dan energi listrik yang dihasilkan. Nilai SFC digunakan sebagai indikator kinerja mesin, di mana nilai yang lebih rendah menunjukkan efisiensi operasional yang lebih baik. Selanjutnya, analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter utama, seperti harga bahan bakar dan efisiensi mesin, terhadap nilai total *Life Cycle Cost* (Wahyu Hayatullah, Pratama, Yakut, & Rachman, 2021). Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor yang paling dominan memengaruhi biaya siklus hidup mesin serta sebagai dasar dalam perumusan strategi pengoptimalan biaya operasional pembangkit.

Diagram Alur Penelitian



Gambar 1. Flowchart Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

PLTD Tenau Kupang mengoperasikan tiga unit mesin diesel utama, yaitu dua unit mesin diesel tipe *MAK 8M 453* (unit *MAK 26843* dan *MAK 26844*) serta satu unit mesin *Caterpillar 3616TA*, untuk memenuhi kebutuhan energi listrik wilayah Kota Kupang dan sekitarnya. Spesifikasi teknis serta nilai investasi masing-masing unit mesin menjadi dasar dalam analisis biaya siklus hidup.

Tabel 1. Ringkasan Spesifikasi Teknis dan Nilai Investasi Unit Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang

No	Mesin	Tipe / Model	Daya Terpasang (kW)	Daya Mampu (kW)	Tahun Operasi / Keterangan	Nilai Investasi (Rp)
1	MAK	26843	2.544	1.500	Operasi awal 2005	2.625.366.035
2	MAK	26844	2.544	1.500	Operasi awal 2005	2.625.366.035
3	Caterpillar	IPD00423 - 3616TA	4.700	3.000	Relokasi dan mulai beroperasi di PLTD Tenau sejak November 2022	12.246.949.528

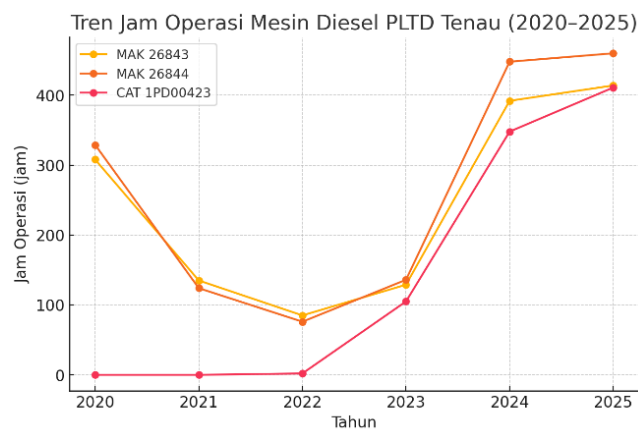
Sumber: PLTD Tenau Kupang

Berdasarkan data operasional periode 2020–2025, jam operasi mesin diesel menunjukkan pola fluktuatif yang dipengaruhi oleh kebutuhan beban sistem dan strategi pengoperasian pembangkit. Pada periode 2020–2022, jam operasi mesin cenderung menurun, sedangkan pada periode 2024–2025 terjadi peningkatan signifikan seiring meningkatnya kebutuhan beban. Mesin *Caterpillar* mulai beroperasi aktif sejak akhir tahun 2022 dan menunjukkan jam operasi tertinggi dibandingkan mesin *MAK* pada periode berikutnya.

Tabel 2. Jam Operasi Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang Tahun 2020–2025

Tahun	MAK 26843 (jam)	MAK 26844 (jam)	CAT IPD00423 (jam)
2020	308	329	0
2021	135	124	0
2022	85	76	2
2023	129	136	105
2024	392	448	348
2025	414	460	411

Sumber: PLTD Tenau Kupang



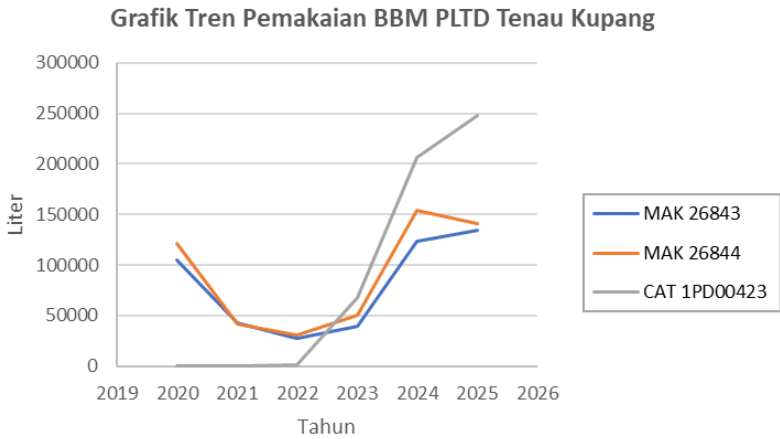
Gambar 2. Grafik Jam Operasi Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang Tahun 2020–2025

Peningkatan jam operasi berdampak langsung terhadap konsumsi bahan bakar. Data menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar tertinggi terjadi pada tahun 2024 dan 2025, dengan mesin *Caterpillar* sebagai penyumbang konsumsi terbesar akibat kapasitas daya mampu yang lebih tinggi. Mesin *MAK* menunjukkan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah, namun relatif stabil mengikuti pola jam operasinya (Xingmin Ren, Jing, & Zhang, 2023).

Tabel 3. Konsumsi Bahan Bakar Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang Tahun 2020–2025

Tahun	MAK 26843 (L)	MAK 26844 (L)	CAT 1PD00423 (L)
2020	104713	121788	0
2021	42451,90	41957,10	0
2022	27146	30461	1753
2023	39549	50767	68007
2024	123287	153521	206039
2025	133909	141112	248378

Sumber: PLTD Tenau Kupang



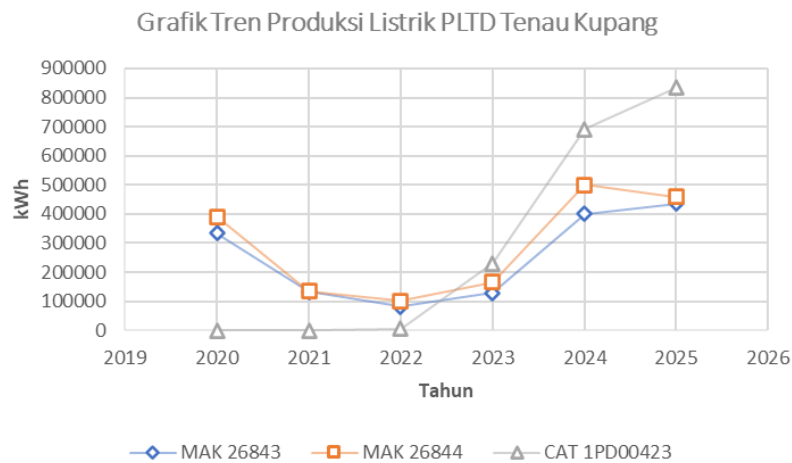
Gambar 3. Grafik Konsumsi Bahan Bakar Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang

Sejalan dengan konsumsi bahan bakar, produksi energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit juga mengalami peningkatan pada periode yang sama. Sejak beroperasi penuh, mesin *Caterpillar* menjadi kontributor utama produksi energi listrik, sementara mesin *MAK* berperan sebagai pendukung beban sistem.

Tabel 4. Produksi Energi Listrik Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang Tahun 2020–2025

Tahun	MAK 26843 (kWH)	MAK 26844 (kWH)	CAT 1PD00423 (kWH)
2020	334238,6	390613,4	0
2021	133494	134422,2	0
2022	82753	100451	5871
2023	129465	166768	230051
2024	400141,8	500237,2	691971,8
2025	434775	459647	833490

Sumber: PLTD Tenau Kupang



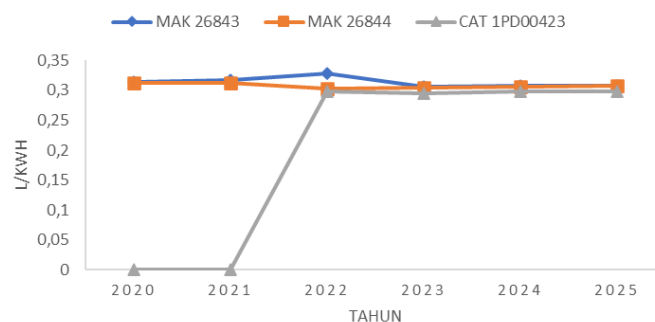
Gambar 4. Grafik Produksi Energi Listrik Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang

Efisiensi operasional mesin dianalisis menggunakan parameter *Specific Fuel Consumption* (SFC). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa mesin *MAK* memiliki nilai SFC pada kisaran 0,30–0,32 L/kWh, sedangkan mesin *Caterpillar* memiliki nilai SFC yang lebih rendah dan stabil, yaitu sekitar 0,295–0,298 L/kWh. Nilai SFC yang lebih rendah menunjukkan efisiensi konversi energi yang lebih baik.

Tabel 5. Nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC) Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang

Tahun	MAK 26843	MAK 26844	CAT 1PD00423
2020	0,3132882	0,3117865	0
2021	0,3180061	0,3121292	0
2022	0,3280364	0,3032424	0,2985863
2023	0,305479	0,3044187	0,2956176
2024	0,3081083	0,3068964	0,2977564
2025	0,3079957	0,3070005	0,297998

Sumber: PLTD Tenau Kupang



Gambar 5. Grafik Perbandingan Nilai SFC Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang

Analisis biaya bahan bakar menunjukkan bahwa komponen ini merupakan penyumbang biaya terbesar dalam struktur *Life Cycle Cost*. Total biaya bahan bakar

meningkat signifikan pada tahun 2024 dan 2025, sejalan dengan peningkatan jam operasi dan produksi energi listrik.

Tabel 6. Biaya Bahan Bakar Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang

Tahun	Harga Rata2 (L)	Konsumsi <i>MAK26843</i> (L)	Biaya <i>MAK26843</i> (Rp)	Konsumsi <i>MAK26844</i> (L)	Biaya <i>MAK26844</i> (Rp)	Konsumsi <i>CAT</i> (L)	Biaya <i>CAT</i> (Rp)	Total Biaya (Rp)
2020	4.961,92	104713	519.577.180	121788	604.301.907	0	-	1.123.879.087
2021	6.881,75	42451,9	292.143.363	41957,1	288.738.273	0	-	580.881.636
2022	12.175,42	27146	330.513.861	30461	370.875.367	1753	21.343.505	722.732.733
2023	10.370,33	39549	410.136.313	50767	526.470.712	68007	705.255.259	1.641.862.284
2024	9.965,83	123287	1.228.657.694	153521	1.529.964.699	206039	2.053.350.334	4.811.972.727
2025	9.835,17	133909	1.317.017.333	141112	1.387.860.039	248378	2.442.839.026	5.147.716.398

Sumber: PLTD Tenau Kupang

Tabel 7. *Present Cost* Biaya Bahan Bakar Mesin *Diesel* (Diskonto 8%)

Tahun	<i>t</i>	Faktor Diskonto $(1/(1,08)^t)$
2020	1	0.9259
2021	2	0.8573
2022	3	0.7938
2023	4	0.7350
2024	5	0.6806
2025	6	0.6302

Sumber: PLTD Tenau Kupang

Hasil perhitungan *Life Cycle Cost* menunjukkan bahwa mesin *Caterpillar* memiliki kontribusi LCC terbesar, yaitu sekitar 59% dari total LCC seluruh unit mesin *diesel*, yang terutama disebabkan oleh besarnya biaya investasi awal yang mencapai lebih dari Rp12 miliar. Pada mesin *MAK*, biaya bahan bakar menjadi komponen dominan dengan kontribusi sekitar 47–51% terhadap total LCC masing-masing unit (Giorgia Casella, Monferdini, Bigliardi, & Bottani, 2025).

Tabel 8. Rekapitulasi *Life Cycle Cost* (LCC) Mesin *Diesel* PLTD Tenau Kupang

Mesin	LCC (Rp)	Kontribusi terhadap <i>Total LCC</i> (%)
MAK 26843	6.219.024.000	19.7%
MAK 26844	6.661.811.000	21.1%
CAT IPD00423	18.667.900.000	59.2%
Total	31.548.735.000	100%

Sumber: PLTD Tenau Kupang

Tabel 9. Distribusi Persentase Komponen Biaya *Life Cycle Cost*

Mesin	Investasi (%)	PC Fuel (%)	PC O&M (%)	PC Overhaul (%)
MAK 26843	42.2%	47.6%	5.9%	4.3%
MAK 26844	39.4%	51.1%	5.5%	4.0%
CAT IPD00423	65.6%	18.6%	9.1%	6.7%

Sumber: PLTD Tenau Kupang

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa perubahan harga bahan bakar dan efisiensi mesin merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap nilai total LCC. Kenaikan harga bahan bakar sebesar 10% meningkatkan total LCC sekitar 3,12%, sedangkan kenaikan 20% meningkatkan LCC hingga sekitar 6,24%. Sebaliknya, perubahan biaya overhaul memberikan pengaruh yang relatif kecil terhadap total LCC.

Tabel 10. Hasil Analisis Sensitivitas *Life Cycle Cost*

Case	LCC MAK 26843 (Rp)	LCC MAK 26844 (Rp)	LCC CAT (Rp)	Total LCC (Rp)	Δ% vs Baseline
Baseline (8%)	6.219.024.000	6.661.811.000	18.667.900.000	31.548.735.000	0.00%
Price +10%	6.515.178.000	7.002.243.000	19.015.120.000	32.532.540.000	+3.12%
Price +20%	6.811.332.000	7.342.676.000	19.362.340.000	33.516.350.000	+6.24%
Price -10%	5.922.871.000	6.321.378.000	18.320.680.000	30.564.930.000	-3.12%
Price -20%	5.626.717.000	5.980.946.000	17.973.460.000	29.581.120.000	-6.24%
SFC +10%	6.515.178.000	7.002.243.000	19.015.120.000	32.532.540.000	+3.12%
SFC -10%	5.922.871.000	6.321.378.000	18.320.680.000	30.564.930.000	-3.12%
Discount 6%	6.506.049.000	6.984.079.000	19.259.400.000	32.749.530.000	+3.81%
Discount 10%	5.961.466.000	6.372.534.000	18.139.390.000	30.473.390.000	-3.41%
Overhaul +10%	6.245.826.000	6.688.613.000	18.792.930.000	31.727.370.000	+0.57%
Overhaul -10%	6.192.223.000	6.635.009.000	18.542.870.000	31.370.110.000	-0.57%

Sumber: PLTD Tenau Kupang

Hasil ini menegaskan bahwa pengendalian konsumsi bahan bakar dan peningkatan efisiensi operasional mesin merupakan faktor kunci dalam upaya pengoptimalan biaya siklus hidup PLTD Tenau Kupang. Strategi pengelolaan beban mesin dan pemeliharaan berbasis kondisi menjadi pendekatan yang paling efektif untuk meningkatkan efisiensi biaya operasional pembangkit.

Berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Cost* (LCC) dan analisis sensitivitas, strategi pengoptimalan biaya operasional PLTD Tenau Kupang difokuskan pada pengendalian konsumsi bahan bakar dan peningkatan efisiensi mesin. Biaya bahan bakar terbukti sebagai komponen paling dominan dan paling sensitif terhadap perubahan harga dan nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC). Oleh karena itu, peningkatan efisiensi teknis mesin melalui pengaturan beban yang optimal, tuning sistem pembakaran, serta penerapan condition-based maintenance direkomendasikan untuk menekan konsumsi bahan bakar dan menjaga keandalan mesin. Selain aspek teknis, pengelolaan risiko harga bahan bakar melalui perencanaan pasokan jangka panjang serta penggunaan parameter ekonomi yang konsisten, seperti discount rate, menjadi penting dalam pengambilan keputusan manajerial. Strategi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi biaya siklus hidup dan mendukung keberlanjutan operasional PLTD Tenau Kupang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data operasional, perhitungan *Life Cycle Cost* (LCC), serta analisis sensitivitas pada mesin *diesel* PLTD Tenau Kupang selama periode 2020–2025, dapat disimpulkan bahwa total biaya siklus hidup tiga unit mesin *diesel* mencapai sekitar Rp 31,55 miliar. Mesin *Caterpillar 1PD00423* memiliki nilai LCC tertinggi, yaitu sekitar Rp 18,67 miliar, sedangkan mesin *MAK 26843* dan *MAK 26844* masing-masing memiliki LCC sebesar sekitar Rp 6,22 miliar dan Rp 6,66 miliar. Tingginya LCC mesin *Caterpillar* terutama dipengaruhi oleh besarnya biaya investasi awal, sementara pada mesin *MAK* biaya bahan bakar menjadi komponen dominan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa biaya bahan bakar merupakan komponen biaya paling signifikan dalam struktur LCC, dengan kontribusi sekitar 47–51% terhadap total LCC pada mesin *MAK*. Efisiensi operasional mesin, yang tercermin dari konsumsi bahan bakar dan nilai *Specific Fuel Consumption* (SFC), berpengaruh langsung terhadap besarnya biaya operasional dan total LCC. Mesin dengan nilai SFC yang lebih rendah mampu menghasilkan energi listrik dengan biaya operasional yang lebih efisien pada periode operasi yang sama. Analisis sensitivitas menegaskan bahwa perubahan harga bahan bakar dan nilai SFC merupakan faktor paling sensitif terhadap LCC, di mana perubahan sebesar $\pm 10\%$ dapat mengubah total LCC sekitar $\pm 3,12\%$ dan perubahan $\pm 20\%$ dapat menyebabkan perubahan hingga $\pm 6,24\%$. Sebaliknya, pengaruh biaya overhaul dan tingkat *diskonto* relatif lebih kecil dibandingkan parameter terkait bahan bakar. Oleh karena itu, pengendalian konsumsi bahan bakar dan peningkatan efisiensi operasional mesin menjadi kunci utama dalam upaya pengoptimalan biaya siklus hidup PLTD Tenau Kupang.

Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan agar pengelola PLTD Tenau Kupang memfokuskan upaya pengelolaan biaya pada peningkatan efisiensi bahan bakar melalui pengaturan beban mesin yang optimal, penerapan pemeliharaan berbasis kondisi, serta perencanaan pasokan bahan bakar yang lebih terstruktur. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan memperluas periode analisis, memasukkan aspek emisi atau keandalan sistem, serta membandingkan hasil LCC dengan skenario integrasi energi terbarukan.

REFERENSI

- Ali, B., & Nugroho, A. (2017). Analisis Pemakaian Bahan Bakar High Speed Diesel dan Biodiesel (B30) terhadap Konsumsi Bahan Bakar dan Emisi Gas Buang Mesin Diesel PLTD 1.4 MW. *Presisi*, 18(2), 30–41.
- Altaf, M., Alaloul, W. S., Musarat, M. A., & Qureshi, A. H. (2023). Life cycle cost analysis (LCCA) of construction projects: sustainability perspective. *Environment, Development and Sustainability*, 25(11), 12071–12118.
- Casella, G., Monferdini, L., Bigliardi, B., & Bottani, E. (2025). Life cycle costing of a milling plant: a case study in Italy. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 19(10), 6885–6900. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02250-5>
- Casella, Giorgia, Monferdini, Laura, Bigliardi, Barbara, & Bottani, Eleonora. (2025). Life cycle costing of a milling plant: a case study in Italy. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 19(10), 6885–6900. <https://doi.org/10.1007/s12008-025-02250-5>
- Gavaldà, O., González, A., Raya, M., Owen, M., Kemausuor, F., & Arranz-Piera, P. (2022). Life Cycle Cost analysis for industrial bioenergy projects: Development of a simulation tool and application to three demand sectors in Africa. *Energy Reports*, 8, 2908–2923. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.041>
- Hayatullah, W., Pratama, S. P., Yakut, F. M., & Rachman, M. (2021). Analisis Performa Generator Set Diesel PLTD Terhadap Perubahan Beban di Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi. 15–27.
- Hayatullah, Wahyu, Pratama, Sandhika Putra, Yakut, Fajar Muhammad, & Rachman, Malik. (2021). Analisis Performa Generator Set Diesel PLTD Terhadap Perubahan Beban di Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi. 15–27.
- Ilham Amba, M., & Dalimi, R. (2023). Economic Analysis of Hybrid Power Plant (Solar-Diesel) on Kawaluso Island, North Sulawesi. *Journal of EECCIS (Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems)*, 17(1), 13–21. <https://doi.org/10.21776/jeeccis.v17i1.1633>
- Li, N., Wang, X., Li, C., Zhang, Z., & Zhang, W. (2022). The efficacy analysis method of input–output for substations based on LCC theory. *Energy Reports*, 8, 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.090>
- Luerssen, C., Gandhi, O., Reindl, T., Sekhar, C., & Cheong, D. (2020). Life cycle cost analysis (LCCA) of PV-powered cooling systems with thermal energy and battery storage for off-grid applications. *Applied Energy*, 273, 115145. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115145>
- Pulau, D. I., & Iyang, G. (2025). Beban Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Diesel. 3(1), 171–179.
- Ren, X., Jing, H., & Zhang, Y. (2023). Construction of digital transformation capability

- of manufacturing enterprises: Qualitative meta-analysis based on current research. *Sustainability*, 15(19), 14168.
- Ren, Xingmin, Jing, Hao, & Zhang, Yaoyao. (2023). Construction of digital transformation capability of manufacturing enterprises: Qualitative meta-analysis based on current research. *Sustainability*, 15(19), 14168.
- Riayatsyah, T. M. I., Geumpana, T. A., Fattah, I. M. R., & Mahlia, T. M. I. (2022). Techno-Economic Analysis of Hybrid Diesel Generators and Renewable Energy for a Remote Island in the Indian Ocean Using HOMER Pro. *Sustainability*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/su14169846>
- Rofiq Salam, R. N., & Widodo, E. (2024). *Periodic Maintenance Analysis of Diesel Motor Generator Set 900 kVA Power as Backup Energy*. <https://doi.org/10.21070/pels.v7i0.1597>
- Romy, R., & Trianto, B. (2022). Energy Analysis of Diesel Engine With B30 at PLTD Selat Panjang. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace -Science and Engineering-*, 66(2), 63–67. <https://doi.org/10.36842/jomase.v66i2.282>
- Susanto, I., Sunanda, W., & Kurniawan, R. (2020). Analisis Pembangkit Tenaga Diesel Di Pulau Celagen. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Pada Masyarakat*, pp. 122–126.
- Widagdo, E. (2013). Optimisasi Pola Pembebanan Daya Mesin Pembangkit Listrik Diesel SWD 16 TM410 Terhadap Efisiensi Konsumsi Bahan Bakar. *Jurnal ELKHA*, 5(2), 1–7.
- Witanto, Y., Amsah, I., Zukri, D., Nuramal, A., & Rosa, M. K. A. (2023). *Performance Analysis of Dual Fuel Diesel Generator with Variations in LPG Flow Rate and Air Hole Diameter*. 17(2), 102–112. <https://doi.org/10.24853/sintek.17.2.102-112>
- Zhao, X, Gui, F., Chen, H., Fan, L., & Pan, P. (2024). Life Cycle Cost Estimation and Analysis of Transformers Based on Failure Rate. *Applied Sciences*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/app14031210>
- Zhao, Xinyue, Gui, Fangxu, Chen, Heng, Fan, Lanxin, & Pan, Peiyuan. (2024). Life Cycle Cost Estimation and Analysis of Transformers Based on Failure Rate. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/app14031210>
- Zou, G., Huang, Y., Chen, W., Wu, L., & Wen, S. (2021). Life-cycle cost model and evaluation system for power grid assets based on fuzzy membership degree. *Global Energy Interconnection*, 4(4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2021.09.011>