



## Analisis Audit Energi Mekanikal dan Elektrikal Berbasis Significant Energy Use (SEU) pada PLTU Stoker

Wisnu Yoga Prasetya\*, Dhany Harmeidy Barus

Program Studi Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia

Email: <sup>1</sup>\*wisnu2310566@itpln.ac.id, <sup>2</sup>dhany@itpln.ac.id

Email Penulis Korespondensi: wisnu2310566@itpln.ac.id

**Abstrak**—Audit energi merupakan instrumen strategis yang krusial untuk mengoptimalkan efisiensi operasional pembangkit sekaligus mendukung program konservasi energi nasional. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem mekanikal dan elektrikal berdasarkan pendekatan Significant Energy Use (SEU), serta mengidentifikasi peluang penghematan energi yang aplikatif pada PLTU tipe stoker berkapasitas 7 MW. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan audit energi rinci melalui kalkulasi performa termal menggunakan analisis heat rate (input-output dan heat loss method), evaluasi gap heat rate terhadap baseline historis, serta pemetaan Significant Energy Use (SEU) pada seluruh peralatan utama mekanikal dan kelistrikan. Hasil audit energi menunjukkan adanya degradasi performa yang signifikan, di mana efisiensi High Pressure Turbine (HPT) aktual hanya mencapai 46,52% dan tekanan vakum kondensor mengalami penurunan hingga 180,32 mmHgA. Selain itu, konsumsi daya pemakaian sendiri (auxiliary power) tercatat cukup tinggi, yakni sebesar 11%. Melalui intervensi operasional, peluang penghematan energi terbesar dapat diperoleh dari pemulihan tekanan vakum kondensor dan peningkatan efisiensi HPT. Secara keseluruhan, total peluang penghematan energi yang teridentifikasi mencapai 71.765,11 GJ/tahun atau setara 1.714 TOE/tahun, dengan estimasi nilai ekonomis mencapai Rp 5.077.394.462,83 per tahun. Selain itu, penurunan auxiliary power dari 11,00% menjadi 9,52% memberikan potensi penghematan sebesar 50,95 kCal/kWh, peningkatan tekanan vakum kondensor sebesar 221,80 kCal/kWh dan peningkatan efisiensi HPT sebesar 167,49 kCal/kWh. Kesimpulan penelitian ini menegaskan bahwa implementasi rekomendasi teknis hasil audit secara berkala sangat efektif untuk menurunkan nilai Net Plant Heat Rate (NPHR), menekan Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik, serta memastikan kepatuhan regulasi lingkungan secara berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Audit Energi; PLTU Stoker; Heat Rate; Significant Energy Use; Peluang Penghematan Energi

**Abstract**—Energy audits are a crucial strategic instrument for optimizing power plant operational efficiency while supporting national energy conservation programs. This study aims to evaluate the performance of mechanical and electrical systems based on the Significant Energy Use (SEU) approach, as well as to identify applicable energy-saving opportunities in a 7 MW stoker-type coal fired power plant. The research method employed is a detailed energy audit approach through thermal performance calculations using heat rate analysis (input-output and heat loss methods), evaluation of the heat rate gap against the historical baseline, and mapping of Significant Energy Use (SEU) across all main mechanical and electrical equipment. The energy audit results reveal a significant performance degradation, where the actual High Pressure Turbine (HPT) efficiency only reaches 46.52% and the condenser vacuum pressure decreases to 180.32 mmHgA. In addition, auxiliary power consumption is recorded at a relatively high level of 11%. Through operational interventions, the largest energy-saving opportunities can be achieved by restoring the condenser vacuum pressure and improving HPT efficiency. Overall, the total identified energy-saving opportunities amount to 71,765.11 GJ/year, equivalent to 1,714 TOE/year, with an estimated economic value reaching IDR 5,077,394,462.83 annually. Furthermore, reducing auxiliary power from 11.00% to 9.52% provides a potential saving of 50.95 kCal/kWh, alongside savings of 221.80 kCal/kWh from condenser vacuum pressure improvement and 167.49 kCal/kWh from HPT efficiency enhancement. The conclusion of this study confirms that the periodic implementation of technical recommendations derived from the audit is highly effective in reducing the Net Plant Heat Rate (NPHR), lowering the basic cost of electricity provision and ensuring sustainable compliance with environmental regulations.

**Keywords:** Energy Audit; Stoker-Type Coal Fired Power Plant; Heat Rate; Significant Energy Use; Energy Saving Opportunities

### 1. PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas perekonomian yang diiringi bertambahnya jumlah penduduk mendorong kebutuhan energi tumbuh pesat, sehingga upaya efisiensi dan konservasi energi menempati posisi strategis dalam menjaga ketahanan energi nasional. Landasan hukum bagi upaya tersebut tertuang dalam Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 serta Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2023, yang memposisikan efisiensi energi sebagai tanggung jawab seluruh sektor (Pambudi et al., 2023). Khusus bagi industri dengan intensitas energi tinggi, termasuk pembangkit listrik, ketentuan pelaksanaannya dipertegas melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 8 Tahun 2025 yang mewajibkan audit energi secara periodik berikut tindak lanjut atas rekomendasinya (Kocak & Durmusoglu, 2024). Aspek efisiensi energi beserta pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) juga telah ditetapkan sebagai kriteria penilaian dalam Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (PROPER) sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri LHK Nomor 7 Tahun 2025.

Audit energi pada dasarnya merupakan prosedur sistematis untuk menilai pola pemanfaatan energi sekaligus menemukan potensi penghematannya pada suatu fasilitas pengguna energi, tidak terkecuali pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Salah satu PLTU berkapasitas 3x7 MW yang mengadopsi teknologi boiler tipe stoker beroperasi di wilayah Kalimantan Barat dan berperan penting dalam menopang pasokan listrik regional. Bertambahnya jam operasi (*lifetime*) menjadikan unit 3 pada PLTU stoker tersebut rentan mengalami penurunan performa, baik pada sisi mekanikal maupun elektrikal. Keausan komponen serta inefisiensi peralatan bantu (*auxiliary equipment*) dapat menaikkan nilai *heat rate* secara perlahan tanpa terdeteksi apabila evaluasi sistematis tidak dilakukan (Fidi et al., 2025).

Kondisi tersebut diperberat oleh karakteristik PLTU stoker yang sensitif terhadap variasi mutu batubara dan biomassa, sehingga kombinasi faktor bahan bakar dan penuaan peralatan kerap bermuara pada naiknya *heat rate*, membengkaknya *auxiliary power*, serta merosotnya efisiensi termal pembangkit (Fauzie et al., 2024).

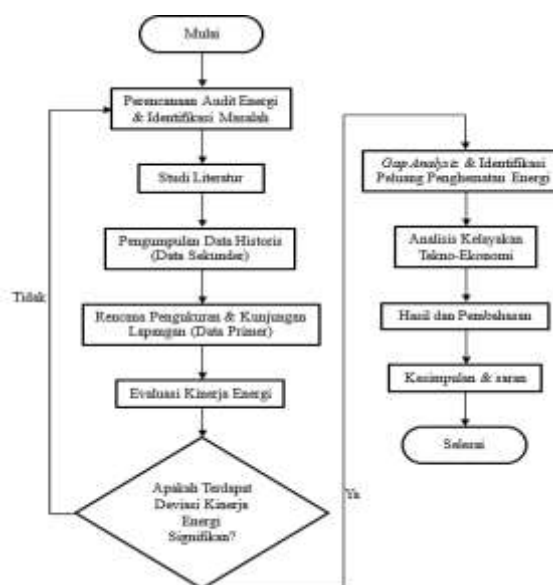
Sejumlah penelitian terdahulu telah menerapkan beragam metode audit energi untuk mengkaji dan menilai kinerja pembangkit listrik. Akan tetapi, mayoritas kajian tersebut masih bersifat parsial karena hanya menyoroti satu aspek analisis secara terpisah. Beberapa studi, misalnya, membatasi evaluasi pada sistem termal mekanikal turbin uap dengan berpedoman pada standar pengujian performa seperti ASME PTC 6 tanpa menelaah keterkaitannya dengan efisiensi sistem elektrik (Febrianto et al., 2025). Studi lain hanya meninjau sisi kelistrikan peralatan *auxiliary power* dengan menyandingkan konsumsi daya aktual terhadap *baseline*, namun mengabaikan implikasi termodinamikanya pada siklus uap. Terdapat pula kajian yang menitikberatkan *gap analysis* untuk memetakan rugi-rugi *heat rate* berdasarkan deviasi parameter operasi, tetapi belum memadukannya dengan identifikasi menyeluruh atas titik pemborosan energi pada peralatan pendukung mekanikal maupun kelistrikan pembangkit. Atas dasar itu, penelitian ini mengembangkan analisis audit energi rinci berbasis *Significant Energy Use* (SEU) yang mencakup keseluruhan sistem mekanikal dan elektrik PLTU stoker.

Penelitian ini dimaksudkan untuk melaksanakan audit energi secara mendalam guna menilai capaian *heat rate*, efisiensi *boiler* dan turbin, mengkaji besaran konsumsi *auxiliary power* serta kualitas daya listrik, dan memetakan peralatan yang tergolong pengguna energi signifikan pada sistem pembangkit (Wahyudi & Yuriadi, 2023). Di samping penerapan metode *input-output* dan *heat loss*, dilakukan pula evaluasi *gap heat rate* terhadap *baseline* historis operasi unit sehingga tingkat degradasi performa aktual dapat diketahui. Melalui kerangka analisis tersebut, potensi penghematan energi dapat diidentifikasi secara lebih terarah dan relevan dengan kondisi operasi PLTU tipe stoker. Luran akhir yang ditargetkan berupa rumusan rekomendasi teknis perbaikan yang implementatif untuk menekan *heat loss*, disertai kajian kelayakan tekno-ekonomi bagi setiap peluang penghematan energi yang diusulkan

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1 Pendekatan Penelitian

Pendekatan yang diadopsi dalam penelitian ini bersifat kuantitatif dengan skema audit energi rinci (*detailed energy audit*) untuk menilai kinerja energi pembangkit sekaligus menggali peluang penghematannya. Pemilihan pendekatan kuantitatif didasari oleh sifat analisis yang bertumpu pada data numerik parameter operasi unit, di antaranya konsumsi bahan bakar, produksi energi listrik, tekanan dan temperatur uap, serta pemakaian daya sendiri. Pelaksanaan audit berpedoman pada standar *Energy Management System* (SNI ISO 50001) dan panduan audit energi (SNI ISO 50002:2014), yang menghendaki adanya prosedur terstruktur dalam mengukur, menganalisis, dan menyusun *baseline* konsumsi energi pembangkit. Analisis diarahkan pada perhitungan parameter kunci meliputi *heat rate*, efisiensi *boiler*, efisiensi turbin, kinerja kondensor, serta besaran *auxiliary power*. Baik pada tahap *preliminary* maupun audit rinci, pendekatan ini memungkinkan perusahaan menentukan secara akurat lokasi pemborosan energi (*Significant Energy Use/SEU*) pada seluruh fasilitas utama maupun penunjangnya.



Gambar 1. Flowchart Alur Penelitian

### 2.2 Pengumpulan Data

Data penelitian dihimpun dalam dua kelompok, yaitu data primer dan data sekunder. Perolehan data primer dilakukan lewat pengamatan langsung serta perekaman parameter operasi secara waktu nyata (*real-time*) sepanjang periode audit



energi berlangsung. Akuisisi data utama dipusatkan di *Central Control Room* (CCR) dengan memanfaatkan sistem pemantauan *Distributed Control System* (DCS), kemudian diverifikasi silang terhadap pembacaan instrumen ukur lokal (*local gauge*) di setiap peralatan. Pengukuran langsung di lapangan (*site*) turut dilakukan dengan bantuan *power quality analyzer*, *flue gas analyzer*, *infrared thermography*, *multimeter*, *relative humidity meter*, *energy meter portable* dan *vibration analyzer*. Selama pengambilan data, beban unit dipertahankan pada kondisi stabil (*steady state*) agar data yang didapatkan terbebas dari anomali data yang ditimbulkan fluktuasi transien sistem. Data sekunder bersumber dari dokumen yang tersedia di pembangkit, meliputi *logsheet* operasional harian, riwayat performa unit, laporan audit energi terdahulu, data desain, data pemakaian bahan bakar, data produksi energi listrik, data *baseline commissioning*, laporan analisis kualitas bahan bakar batubara, serta spesifikasi teknis peralatan. Kumpulan data ini dimanfaatkan sebagai pembandingan terhadap hasil pengukuran aktual, khususnya dalam mengevaluasi kinerja pembangkit serta menganalisis kesenjangan terhadap kondisi desain maupun performa terbaik yang pernah diraih.

### 2.3 Analisis Konsumsi Energi dan Produksi Energi Listrik

Energi yang dikonsumsi PLTU Stoker Unit 3 terbagi atas dua kategori, yaitu energi primer dan energi final. Batubara dan biomassa merupakan energi primer yang digunakan unit ini. Adapun energi final yang dikonsumsi berupa energi listrik hasil produksi pembangkit itu sendiri.

**Tabel 1.** Konsumsi Batubara dan Biomassa Januari 2021 – September 2025

| Bulan Tahun | Konsumsi Batubara kg | Konsumsi Cangkrang kg | Konsumsi Woodchip kg | Pemakaian Energi Bahan Bakar |          |
|-------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|----------|
|             |                      |                       |                      | kCal                         | TOE      |
| Mar-21      | 5.097.190,00         | 0,00                  | 0,00                 | 20.371.837.329,20            | 2.035,82 |
| Apr-21      | 3.193.240,00         | 0,00                  | 0,00                 | 12.760.187.040,00            | 1.275,16 |
| May-21      | 4.564.740,00         | 0,00                  | 0,00                 | 18.141.737.476,80            | 1.812,96 |
| Jun-21      | 5.825.910,00         | 0,00                  | 0,00                 | 22.996.847.579,40            | 2.298,15 |
| Jul-21      | 6.034.390,00         | 0,00                  | 0,00                 | 23.968.114.328,80            | 2.395,21 |
| Aug-21      | 4.282.710,00         | 0,00                  | 0,00                 | 16.982.272.790,10            | 1.697,09 |
| Sep-21      | 5.508.480,00         | 0,00                  | 0,00                 | 21.878.085.100,80            | 2.186,34 |
| Oct-21      | 4.522.600,00         | 16.340,00             | 0,00                 | 17.576.542.188,00            | 1.756,48 |
| Nov-21      | 3.913.630,00         | 67.080,00             | 0,00                 | 14.272.852.064,80            | 1.426,33 |
| Dec-21      | 4.634.380,00         | 243.380,00            | 0,00                 | 17.366.226.798,80            | 1.735,46 |
| Jan-22      | 5.628.430,00         | 311.320,00            | 0,00                 | 21.984.366.158,50            | 2.196,97 |
| Feb-22      | 4.204.380,00         | 0,00                  | 0,00                 | 16.582.074.720,00            | 1.657,10 |
| Mar-22      | 1.794.690,00         | 0,00                  | 0,00                 | 6.881.613.176,70             | 687,70   |
| Apr-22      | 5.564.020,00         | 0,00                  | 0,00                 | 21.732.672.638,60            | 2.171,81 |
| May-22      | 5.779.870,00         | 0,00                  | 0,00                 | 22.390.580.594,30            | 2.237,56 |
| Jun-22      | 5.662.820,00         | 81.700,00             | 0,00                 | 22.187.834.811,20            | 2.217,30 |
| Jul-22      | 3.960.810,00         | 0,00                  | 0,00                 | 14.993.250.174,00            | 1.498,32 |
| Aug-22      | 5.532.090,00         | 581.360,00            | 0,00                 | 21.560.269.677,90            | 2.154,58 |
| Sep-22      | 5.393.390,00         | 86.000,00             | 0,00                 | 20.925.867.794,90            | 2.091,19 |
| Oct-22      | 4.679.130,00         | 37.240,00             | 0,00                 | 17.954.804.427,30            | 1.794,28 |
| Nov-22      | 5.373.010,00         | 0,00                  | 0,00                 | 20.432.160.047,40            | 2.041,85 |
| Dec-22      | 6.026.260,00         | 29.400,00             | 0,00                 | 23.215.383.236,20            | 2.319,98 |
| Jan-23      | 4.949.540,00         | 71.500,00             | 63.160,00            | 18.380.661.239,40            | 1.836,84 |
| Feb-23      | 4.856.620,00         | 48.630,00             | 18.780,00            | 18.865.248.992,80            | 1.885,26 |
| Mar-23      | 3.535.250,00         | 73.120,00             | 0,00                 | 13.973.393.797,50            | 1.396,40 |
| Apr-23      | 5.799.520,00         | 0,00                  | 0,00                 | 22.299.560.366,40            | 2.228,46 |
| May-23      | 5.955.600,00         | 0,00                  | 43.330,00            | 23.234.880.060,00            | 2.321,93 |
| Jun-23      | 5.704.470,00         | 0,00                  | 252.000,00           | 22.255.134.034,50            | 2.224,02 |
| Jul-23      | 5.640.310,00         | 0,00                  | 406.970,00           | 22.027.723.077,10            | 2.201,30 |
| Aug-23      | 5.848.520,00         | 0,00                  | 435.000,00           | 21.832.408.189,60            | 2.181,78 |
| Sep-23      | 3.931.880,00         | 84.410,00             | 175.000,00           | 14.513.709.325,20            | 1.450,40 |
| Oct-23      | 5.286.810,00         | 97.310,00             | 308.000,00           | 20.312.452.701,00            | 2.029,89 |
| Nov-23      | 2.697.000,00         | 132.630,00            | 147.900,00           | 10.136.755.410,00            | 1.013,00 |
| Dec-23      | 4.608.500,00         | 0,00                  | 63.420,00            | 17.298.511.685,00            | 1.728,69 |
| Jan-24      | 4.359.780,00         | 0,00                  | 0,00                 | 16.752.018.672,00            | 1.674,08 |
| Feb-24      | 470.250,00           | 0,00                  | 0,00                 | 1.751.211.000,00             | 175,00   |
| Mar-24      | 4.202.290,00         | 1.643.550,00          | 642.160,00           | 16.447.763.060,00            | 1.643,68 |
| Apr-24      | 4.932.410,00         | 1.604.780,00          | 259.270,00           | 19.478.087.090,00            | 1.946,51 |
| May-24      | 6.122.440,00         | 694.640,00            | 0,00                 | 22.953.027.560,00            | 2.293,77 |
| Jun-24      | 4.400.230,00         | 1.701.720,00          | 0,00                 | 17.323.705.510,00            | 1.731,21 |



| Bulan Tahun | Konsumsi Batubara kg | Konsumsi Cangkang kg | Konsumsi Woodchip kg | Pemakaian Energi Bahan Bakar |          |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------|
|             |                      |                      |                      | kCal                         | TOE      |
| Jul-24      | 4.656.510,00         | 1.165.640,00         | 0,00                 | 18.337.336.380,00            | 1.832,51 |
| Aug-24      | 3.757.190,00         | 2.542.560,00         | 0,00                 | 15.088.875.040,00            | 1.507,88 |
| Sep-24      | 4.431.950,00         | 1.680.090,00         | 0,00                 | 17.763.255.600,00            | 1.775,14 |
| Oct-24      | 4.030.860,00         | 1.665.610,00         | 0,00                 | 16.300.797.840,00            | 1.628,99 |
| Nov-24      | 2.325.340,00         | 1.770.580,00         | 0,00                 | 9.426.928.360,00             | 942,06   |
| Dec-24      | 3.096.540,00         | 2.763.730,00         | 0,00                 | 12.150.822.960,00            | 1.214,27 |
| Jan-25      | 5.019.770,00         | 1.545.250,00         | 0,00                 | 19.220.699.330,00            | 1.920,78 |
| Feb-25      | 3.512.710,00         | 1.779.790,00         | 120.610,00           | 13.408.014.070,00            | 1.339,90 |
| Mar-25      | 4.402.100,00         | 2.120.620,00         | 282.780,00           | 16.921.672.400,00            | 1.691,03 |
| Apr-25      | 5.101.200,00         | 567.550,00           | 0,00                 | 19.909.983.600,00            | 1.989,67 |
| May-25      | 4.310.480,00         | 2.575.640,00         | 123.480,00           | 17.543.653.600,00            | 1.753,19 |
| Jun-25      | 4.541.830,00         | 1.838.610,00         | 185.890,00           | 18.362.618.690,00            | 1.835,03 |
| Jul-25      | 1.416.800,00         | 0,00                 | 0,00                 | 5.586.442.400,00             | 558,27   |
| Aug-25      | 2.637.970,00         | 1.928.960,00         | 206.470,00           | 10.401.515.710,00            | 1.039,46 |
| Sep-25      | 5.364.570,00         | 810.650,00           | 132.620,00           | 21.404.634.300,00            | 2.139,03 |

**Tabel 2.** Produksi Energi Listrik PLTU Stoker Unit 3 Periode Januari 2021 – September 2025

| Bulan  | kWh Gross kWh | kWh Netto kWh | PS UAT kWh | Energy Import kWh |
|--------|---------------|---------------|------------|-------------------|
| Jan-21 | 4.211.650,00  | 3.852.870,00  | 358.780,00 | 0,00              |
| Feb-21 | 2.599.550,00  | 2.318.590,00  | 280.960,00 | 71.430,00         |
| Mar-21 | 4.532.170,00  | 4.119.930,00  | 412.240,00 | 0,00              |
| Apr-21 | 2.621.810,00  | 2.277.530,00  | 344.280,00 | 91.210,00         |
| May-21 | 3.716.820,00  | 3.315.590,00  | 401.230,00 | 28.440,00         |
| Jun-21 | 4.317.340,00  | 3.919.330,00  | 398.010,00 | 0,00              |
| Jul-21 | 4.345.640,00  | 3.914.730,00  | 430.910,00 | 4.610,00          |
| Aug-21 | 3.330.480,00  | 2.938.120,00  | 392.360,00 | 67.930,00         |
| Sep-21 | 4.301.600,00  | 3.877.750,00  | 423.850,00 | 0,00              |
| Oct-21 | 3.353.200,00  | 2.926.120,00  | 427.080,00 | 54.960,00         |
| Nov-21 | 2.860.320,00  | 2.444.420,00  | 415.900,00 | 56.300,00         |
| Dec-21 | 3.515.690,00  | 3.044.570,00  | 471.120,00 | 19.880,00         |
| Jan-22 | 3.470.860,00  | 3.004.800,00  | 466.060,00 | 8.340,00          |
| Feb-22 | 2.977.250,00  | 2.593.340,00  | 383.910,00 | 39.780,00         |
| Mar-22 | 1.385.120,00  | 1.177.940,00  | 207.180,00 | 41.860,00         |
| Apr-22 | 4.295.160,00  | 3.878.880,00  | 416.280,00 | 2.980,00          |
| May-22 | 4.257.090,00  | 3.822.120,00  | 434.970,00 | 0,00              |
| Jun-22 | 4.192.910,00  | 3.770.210,00  | 422.700,00 | 0,00              |
| Jul-22 | 2.947.880,00  | 2.580.020,00  | 367.860,00 | 90.720,00         |
| Aug-22 | 3.323.290,00  | 2.894.790,00  | 428.500,00 | 36.780,00         |
| Sep-22 | 3.794.190,00  | 3.421.517,86  | 372.672,14 | 3.890,00          |
| Oct-22 | 2.476.220,00  | 2.027.160,00  | 449.060,00 | 39.700,00         |
| Nov-22 | 3.880.860,00  | 3.485.370,00  | 395.490,00 | 15.980,00         |
| Dec-22 | 3.953.300,00  | 3.518.540,00  | 434.760,00 | 1.940,00          |
| Jan-23 | 3.384.290,00  | 2.979.830,00  | 404.460,00 | 35.930,00         |
| Feb-23 | 3.313.120,00  | 2.938.135,19  | 374.984,81 | 5.368,81          |
| Mar-23 | 2.387.990,00  | 2.025.142,00  | 362.848,00 | 95.978,00         |
| Apr-23 | 4.073.140,00  | 3.627.406,00  | 445.734,00 | 42,00             |
| May-23 | 4.072.010,00  | 3.607.065,00  | 464.945,00 | 2.703,00          |
| Jun-23 | 3.740.250,00  | 3.295.176,00  | 445.074,00 | 2.648,00          |
| Jul-23 | 3.994.430,00  | 3.565.788,00  | 428.642,00 | 6.780,00          |
| Aug-23 | 4.035.210,00  | 3.565.934,00  | 469.276,00 | 0,00              |
| Sep-23 | 3.014.780,00  | 2.626.233,50  | 388.546,50 | 41.745,56         |
| Oct-23 | 4.083.770,00  | 3.588.451,60  | 495.318,40 | 0,00              |
| Nov-23 | 2.471.510,00  | 2.133.618,31  | 337.891,69 | 0,00              |
| Dec-23 | 3.450.570,00  | 3.003.238,69  | 447.331,31 | 0,00              |
| Jan-24 | 2.914.660,00  | 2.511.763,55  | 402.896,45 | 0,00              |
| Feb-24 | 337.670,00    | 282.153,00    | 55.517,00  | 0,00              |
| Mar-24 | 4.864.930,00  | 4.203.337,57  | 661.592,43 | 0,00              |



| Bulan  | kWh Gross<br>kWh | kWh Netto<br>kWh | PS UAT<br>kWh | Energy Import<br>kWh |
|--------|------------------|------------------|---------------|----------------------|
| Apr-24 | 4.690.000,00     | 4.071.090,00     | 618.910,00    | 0,00                 |
| May-24 | 4.825.250,00     | 4.169.949,84     | 655.300,16    | 79,00                |
| Jun-24 | 4.563.440,00     | 3.953.495,96     | 609.944,04    | 1.057,00             |
| Jul-24 | 4.176.760,00     | 3.637.705,65     | 539.054,35    | 0,00                 |
| Aug-24 | 4.863.290,00     | 4.262.802,00     | 600.488,00    | 0,00                 |
| Sep-24 | 4.744.810,00     | 4.166.333,00     | 578.477,00    | 0,00                 |
| Oct-24 | 3.979.210,00     | 3.426.414,00     | 552.796,00    | 10,00                |
| Nov-24 | 3.201.730,00     | 2.729.003,78     | 472.726,22    | 0,00                 |
| Dec-24 | 4.048.830,00     | 3.542.519,00     | 506.311,00    | 0,00                 |
| Jan-25 | 4.548.230,00     | 4.000.337,00     | 547.893,00    | 0,00                 |
| Feb-25 | 3.739.420,00     | 3.359.473,00     | 379.947,00    | 26.191,00            |
| Mar-25 | 4.338.200,00     | 3.935.312,00     | 402.888,00    | 2.977,00             |
| Apr-25 | 3.756.470,00     | 3.337.181,00     | 419.289,00    | 52.778,00            |
| May-25 | 4.695.320,00     | 4.237.043,00     | 458.277,00    | 14.376,00            |
| Jun-25 | 4.417.260,00     | 3.977.849,00     | 439.411,00    | 8.793,00             |
| Jul-25 | 978.390,00       | 869.965,00       | 108.425,00    | 10.726,00            |
| Aug-25 | 3.674.040,00     | 3.193.273,00     | 480.767,00    | 84.795,00            |
| Sep-25 | 4.736.040,00     | 4.232.127,00     | 503.913,00    | 22.443,00            |

## 2.4 Analisis Energy Baseload dan Baseline

Penentuan *energy baseload* dan *baseline* dilakukan dengan mengukur dua variabel, yakni konsumsi bahan bakar serta produksi energi bersih (*netto*) yang dihasilkan. Kedua variabel tersebut dipetakan ke dalam sebuah grafik hingga diperoleh persamaan garis yang mewakili *energy baseload* dan *energy baseline*. *Energy baseload* merepresentasikan besarnya energi yang tetap diperlukan sekalipun proses produksi sedang tidak berlangsung, sementara *energy baseline* berfungsi sebagai tolok ukur atau acuan dalam pelaksanaan konversi energi pada rentang waktu tertentu. Keterkaitan antara *baseload* dan *baseline* dapat dinyatakan secara kuantitatif melalui persamaan garis *linear* beserta analisis regresi *linear*.

## 2.5 Analisis Measurement and Verification Energy (M & V)

*Measurement and verification energy* (M&V) merupakan teknik verifikasi yang dipakai untuk menilai kinerja efisiensi pembangkit dalam kurun waktu tertentu. Pada penelitian ini, M&V diterapkan guna menghitung *energy saving* maupun *loss* di PLTU Stoker Unit 3 sepanjang Januari 2021 hingga September 2025. *Energy saving* terjadi manakala konsumsi energi aktual berada di bawah nilai *baseline*; sebaliknya, *energy loss* timbul ketika konsumsi aktual melampaui *baseline*. Besaran *energy saving/loss* tersebut dihitung memakai persamaan *baseline* (1) sebagai berikut :

$$\text{Konsumsi energi bahan bakar } (\times 10^6 \text{ kCal}) = [5,2038 \times \text{Produksi Listrik (Net)}] + 1.292,9 \quad (1)$$

## 2.6 Analisis Evaluasi Boiler dan Turbin

Merujuk pada standar ASME PTC 4 2013 – *steam generator*, efisiensi *boiler* dapat dihitung melalui dua pendekatan, yakni metode langsung (*input-output*) dan metode tidak langsung (*heat loss*). Pendekatan pertama dinamakan metode *input-output* sebab hanya membutuhkan data keluaran berupa uap (*steam*) dan masukan panas dari bahan bakar untuk memperoleh nilai efisiensi. Adapun pada pendekatan tidak langsung (*heat loss method*), efisiensi diperoleh dengan mengurangi seluruh *losses* yang timbul di *boiler* dari energi bahan bakar yang masuk. Persamaan efisiensi *boiler* menurut metode *heat loss* dituliskan pada persamaan (2):

$$\eta_{\text{boiler}} = \left[ 1 - \frac{\sum \text{Losses}}{(H_f + B)} \right] \quad (2)$$

Dalam evaluasi penghematan energi PLTU, efisiensi turbin menjadi salah satu parameter yang paling menentukan. Merosotnya efisiensi turbin berdampak langsung pada naiknya *heat rate*, bertambahnya kebutuhan bahan bakar, dan turunnya efisiensi pembangkit secara menyeluruh. Kajian efisiensi turbin tergolong dalam *tertiary index*, yakni indikator terperinci untuk menilai performa peralatan utama unit. Analisis ini ditujukan untuk mengukur sejauh mana energi panas uap mampu diubah menjadi kerja mekanik secara efektif. Ketika efisiensi turbin menurun, sebagian energi panas yang semestinya dimanfaatkan justru terbuang sebagai *losses*, sehingga diperlukan bahan bakar lebih banyak untuk membangkitkan daya yang setara. Perhitungan efisiensi turbin memakai pendekatan isentropik, yaitu rasio kerja aktual turbin terhadap kerja idealnya (isentropik), sebagaimana persamaan (3):

$$\eta_t = \left( \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

## 2.7 Analisis Evaluasi Heat Rate

*Heat rate* menyatakan banyaknya energi yang dipasok ke dalam siklus melalui proses perpindahan panas untuk menghasilkan sejumlah keluaran tertentu. Perhitungan *turbine heat rate* dapat ditempuh dengan beberapa cara, salah satunya dengan terlebih dahulu menyusun *heat balance* guna mengetahui aliran energi yang masuk dan keluar turbin, lalu membandingkannya dengan energi yang dibangkitkan *generator*. Secara sederhana, *heat rate* menggambarkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk memproduksi setiap 1 kWh listrik. Di samping *turbine heat rate* (THR), dikenal pula *Gross Plant Heat Rate* (GPHR) dan *Net Plant Heat Rate* (NPHR).

GPHR didefinisikan sebagai besarnya energi yang dipakai untuk memproduksi 1 kWh listrik *gross* tanpa memperhitungkan energi yang terpakai dalam proses produksinya. Formulasi GPHR ditunjukkan pada persamaan (4):

$$GPHR = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{\eta_{boiler} \times \text{Gross production}} \quad (4)$$

Sementara itu, NPHR menyatakan energi yang diperlukan untuk menghasilkan 1 kWh listrik *netto* dengan turut memperhitungkan energi yang dikonsumsi selama proses produksi berlangsung. Formulasi NPHR disajikan pada persamaan (5):

$$NPHR = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{\eta_{boiler} \times \text{Net production}} \quad (5)$$

## 2.8 Analisis Evaluasi Sistem Kelistrikan pada Auxiliary Power

Pada PLTU Stoker Unit 3 terpasang satu unit *steam turbine generator* dengan kapasitas total 7 MW. Keluaran setiap *generator* disalurkan menuju GI 20 KV dan sebagian dayanya dialokasikan untuk memenuhi kebutuhan listrik pemakaian sendiri di lingkungan pembangkit melalui *auxiliary transformer* 380V.



**Gambar 2.** Pengambilan Data Primer Auxiliary Power Consumption

Karakteristik kualitas daya listrik direkam menggunakan PQM (*Power Quality Meter*) pada sejumlah titik pengukuran tegangan keluaran panel kontrol 380V.

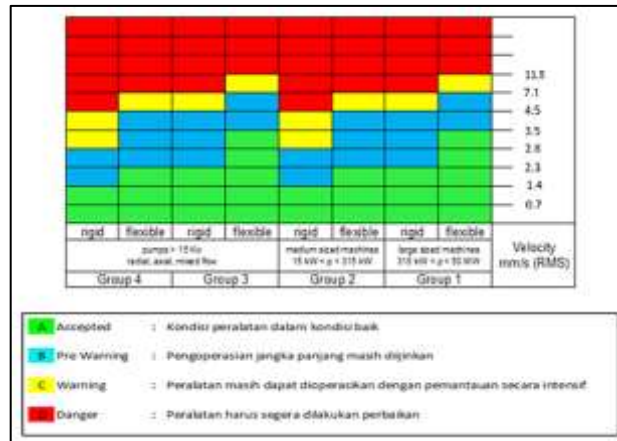
## 2.9 Analisis Evaluasi Vibrasi pada Peralatan Utama PLTU Stoker

Evaluasi kondisi mekanis serta kesehatan operasional unit pembangkit dilakukan melalui pengukuran vibrasi, dengan sasaran mencegah kegagalan yang terjadi tiba-tiba sekaligus memperpanjang usia pakai komponen. Kegiatan pengamatan dan evaluasi vibrasi memanfaatkan *vibration analyzer* dan *logger* yang mampu merekam data spektrum dari tiap peralatan pembangkit.

Suatu peralatan pembangkit dinyatakan dalam kondisi baik apabila tingkat vibrasinya tidak melampaui ambang batas yang ditetapkan standar. Acuan yang digunakan dalam pengukuran getaran adalah ISO 20816-2 untuk turbin uap dan generator, serta ISO 20816-3 untuk peralatan *rotary machine* industri pada umumnya.

| Speed (RPM) |      | Velocity mm/s (RMS)                         | Machine |      | Class I<br>Small<br>Machines | Class II<br>Medium<br>Machines | Class III<br>Large Rigid<br>Foundation | Class IV<br>Large Soft<br>Foundation |
|-------------|------|---------------------------------------------|---------|------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
|             |      |                                             | in/s    | mm/s |                              |                                |                                        |                                      |
| 1500        | 3000 | 11<br>10<br>8.5<br>7.5<br>5.9<br>3.8<br>0.7 | 0.01    | 0.28 |                              |                                |                                        |                                      |
|             |      |                                             | 0.02    | 0.45 |                              |                                |                                        |                                      |
|             |      |                                             | 0.03    | 0.71 |                              |                                |                                        |                                      |
|             |      |                                             | 0.04    | 1.12 |                              |                                | Good                                   |                                      |
|             |      |                                             | 0.07    | 1.80 |                              |                                |                                        |                                      |
|             |      |                                             | 0.11    | 2.80 |                              |                                | Satisfactory                           |                                      |
|             |      |                                             | 0.18    | 4.50 |                              |                                |                                        |                                      |
|             |      |                                             | 0.28    | 7.10 |                              |                                | Unsatisfactory                         |                                      |
|             |      |                                             | 0.44    | 11.2 |                              |                                |                                        |                                      |
|             |      |                                             | 0.70    | 18.0 |                              |                                | Unacceptable                           |                                      |
| 1500        | 3000 | 11<br>10<br>8.5<br>7.5<br>5.9<br>3.8<br>0.7 | 0.71    | 28.0 |                              |                                |                                        |                                      |
|             |      |                                             | 1.10    | 45.0 |                              |                                |                                        |                                      |

**Gambar 3.** Standar ISO 20816-2



**Gambar 4.** Standar ISO 20816-3

### 2.10 Analisis Evaluasi *Infrared Thermography* pada Peralatan Utama PLTU Stoker

Pemeriksaan kondisi *thermal* pada setiap *auxiliary equipment* dilakukan memakai *thermal imager camera*, yaitu perangkat yang dapat memindai sekaligus menampilkan sebaran suhu permukaan benda atau mesin secara cepat dan presisi. Penilaian kondisi *thermal* peralatan mengikuti acuan tabel standar NETA *Maintenance Testing Specification for Electrical and/or Mechanical Equipments*, sebagaimana disajikan pada tabel berikut :

**Tabel 3.** Standar NETA

| Priority | Delta T     | Recommended Action                                                 |
|----------|-------------|--------------------------------------------------------------------|
| 4        | 1 to 10°C   | Corrective measures should be taken at the next maintenance period |
| 3        | >10 to 20°C | Corrective measures required as scheduling permits                 |
| 2        | >20 to 40°C | Corrective measures required ASAP                                  |
| 1        | >40°C       | Corrective measures required immediately                           |

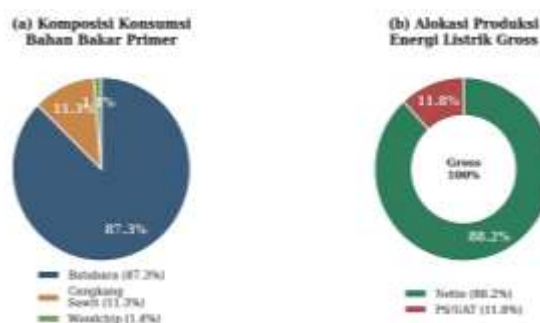
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Profil Konsumsi Energi dan Produksi Energi Listrik

Merujuk data *logsheet* operasional Januari 2021 hingga September 2025 yang dirangkum pada Tabel 1 dan Tabel 2, konsumsi batubara PLTU Stoker Unit 3 bergerak fluktuatif pada rentang 1,4 hingga 6,0 juta kg per bulan, disertai kontribusi *co-firing* biomassa (cangkang dan *woodchip*) yang tumbuh nyata sejak pertengahan 2023. Sepanjang Januari - September 2025, perbandingan konsumsi biomassa terhadap batubara tercatat lebih tinggi daripada tahun-tahun sebelumnya, menandakan keberhasilan program diversifikasi energi primer selaras dengan arah kebijakan transisi energi nasional.

Produksi energi listrik *gross* unit memperlihatkan pola yang fluktuatif namun cenderung stabil pada rentang 1 - 4,7 juta kWh per bulan. Selisih antara produksi *gross* dan produksi *netto* merepresentasikan konsumsi listrik pemakaian sendiri (*Unit Auxiliary Transformer/UAT*), yang menjadi salah satu komponen penting dalam evaluasi *auxiliary power* pada pembahasan berikutnya.

Untuk memperjelas struktur konsumsi energi primer dan alokasi energi listrik yang dihasilkan, komposisi kedua aspek tersebut selama periode Januari 2021 - September 2025 divisualisasikan pada Gambar 5. Grafik (a) memperlihatkan proporsi konsumsi bahan bakar primer, sedangkan grafik (b) menyajikan pembagian produksi energi listrik *gross* terhadap energi *netto* yang tersalurkan dan energi pemakaian sendiri.



**Gambar 5.** Komposisi Konsumsi Bahan Bakar Primer dan Alokasi Produksi Energi Listrik Periode Januari 2021- September 2025



Berdasarkan Gambar 5(a), batubara masih mendominasi bauran bahan bakar primer dengan pangsa sebesar 87,3%, diikuti oleh cangkang sawit sebesar 11,3% dan *woodchip* sebesar 1,4%. Kontribusi biomassa (cangkang dan *woodchip*) yang secara kumulatif mencapai 12,7% sepanjang periode 2021 - 2025 mengindikasikan bahwa program *co-firing* pada PLTU Stoker Unit 3 telah mulai berjalan, dengan tren pemanfaatan yang meningkat pesat pada tahun 2023 - 2025 sehingga berpotensi menekan emisi karbon serta ketergantungan terhadap batubara, selaras dengan arah kebijakan transisi energi nasional.

Sementara itu, Gambar 5(b) menunjukkan bahwa dari total produksi energi listrik *gross*, sebesar 88,2% tersalurkan sebagai energi *netto*, sedangkan 11,8% terserap sebagai konsumsi pemakaian sendiri (*Unit Auxiliary Transformer/UAT*). Proporsi pemakaian sendiri sebesar 11,8% ini menjadi indikator awal yang penting, mengingat semakin tinggi rasio *auxiliary power* maka semakin besar pula energi yang tidak termanfaatkan secara komersial. Nilai tersebut menjadi dasar evaluasi lebih lanjut pada analisis *Significant Energy Use* (SEU) dan *auxiliary power*.

### 3.2 Kinerja Energi (*Net Plant Heat Rate*)

Kinerja energi pembangkit dinilai melalui indikator *Net Plant Heat Rate* (NPHR) metode *heat loss*, yang menyatakan jumlah energi panas (kCal) untuk membangkitkan setiap 1 kWh listrik *netto*. Capaian NPHR terbaik tahunan berikut efisiensi *plant* PLTU Stoker Unit 3 selama Januari 2021 hingga September 2025 direkapitulasi pada Tabel 4.

**Tabel 4.** NPHR Terendah dan Efisiensi *Plant* Tahunan

| Tahun          | NPHR (kCal/kWh) | Efisiensi (%) |
|----------------|-----------------|---------------|
| 2021           | 3.534,04        | 24,33         |
| 2022           | 4.150,00        | 20,72         |
| 2023           | 3.365,02        | 25,55         |
| 2024           | 4.039,16        | 21,29         |
| 2025 (s.d Sep) | 3.921,99        | 21,92         |



**Gambar 6.** Tren NPHR Bulanan Metode *Heat Loss* Periode Januari 2021 - September 2025

Gambar 6 memperlihatkan rata-rata NPHR lima tahun terakhir sebesar 4.495,72 kCal/kWh; capaian terbaik terjadi pada Desember 2023 (3.365,02 kCal/kWh), sedangkan yang terburuk pada Juni 2023 (6.438,88 kCal/kWh). Volatilitas *heat rate* bulanan yang cukup lebar ini mengindikasikan kuatnya pengaruh mutu bahan bakar, kondisi peralatan utama (*boiler*, turbin, kondensor), dan pola operasi musiman terhadap kinerja termal unit. Hal serupa dikemukakan Ramesh *et al.* (2017) yang menempatkan kondisi kondensor serta kualitas uap sebagai penentu utama efisiensi konsumsi uap pada PLTU berbasis turbin uap.

### 3.3 Pemetaan *Significant Energy Use* (SEU)

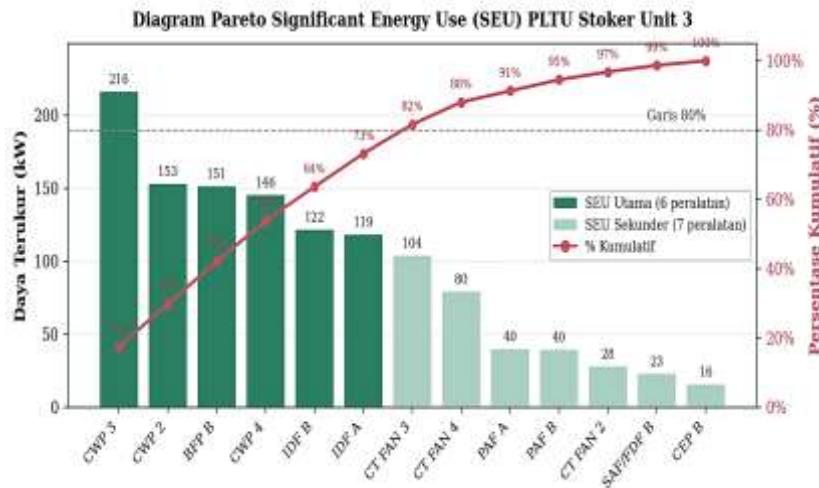
Pemetaan SEU dilakukan terhadap 13 peralatan *auxiliary* utama berdasarkan hasil pengukuran beban di panel saat survei audit energi. Total pemakaian sendiri terukur untuk seluruh peralatan tersebut adalah 1.238,30 kW atau setara 29.719,20 kWh per hari, sebagaimana dirinci pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Pemetaan *Significant Energy Use* (SEU)

| Peralatan | Daya (kW) | Energi (kWh/hr) | % SEU  | % Kumulatif |
|-----------|-----------|-----------------|--------|-------------|
| CWP 3     | 216,5     | 5.196,0         | 17,48% | 69,84%      |
| CWP 2     | 153,4     | 3.681,6         | 12,39% | 52,35%      |
| BFP B     | 151,4     | 3.633,6         | 12,23% | 39,97%      |
| CWP 4     | 145,5     | 3.492,0         | 11,75% | 81,59%      |
| IDF B     | 121,7     | 2.920,8         | 9,83%  | 19,41%      |
| IDF A     | 118,6     | 2.846,4         | 9,58%  | 9,58%       |
| CT FAN 3  | 104,2     | 2.500,8         | 8,41%  | 93,58%      |
| CT FAN 4  | 79,5      | 1.908,0         | 6,42%  | 100,00%     |

| Peralatan | Daya (kW) | Energi (kWh/hr) | % SEU | % Kumulatif |
|-----------|-----------|-----------------|-------|-------------|
| PAF A     | 40,1      | 962,4           | 3,24% | 24,53%      |
| PAF B     | 39,8      | 955,2           | 3,21% | 27,74%      |
| SAF/FDF B | 23,3      | 559,2           | 1,88% | 21,29%      |
| CT FAN 2  | 28,4      | 681,6           | 2,29% | 85,17%      |
| CEP B     | 15,9      | 381,6           | 1,28% | 82,87%      |
| Total     | 1.238,3   | 29.719,2        | 100%  | -           |

Berdasarkan prinsip analisis *Pareto* (80/20), enam peralatan dengan kontribusi terbesar - *Circulating Water Pump* (CWP) 2, 3 dan 4, *Boiler Feed Pump* (BFP) B, serta *Induced Draft Fan* (IDF) A dan B, yang seluruhnya tergolong SEU utama - secara kumulatif menyumbang lebih dari 73% dari total energi pemakaian sendiri yang terukur, sedangkan tujuh peralatan sisanya (PAF A/B, SAF/FDF B, CT FAN 2/3/4, dan CEP B) tergolong SEU sekunder dengan kontribusi individual di bawah 9%. Keenam peralatan SEU utama ini selanjutnya menjadi prioritas utama dalam program pemeliharaan prediktif dan evaluasi efisiensi energi, karena potensi penghematan paling signifikan berada pada kelompok ini. Hasil pemetaan SEU pada Tabel 5 selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk diagram *Pareto* pada Gambar 7, yang menggabungkan grafik batang daya terukur setiap peralatan (terurut dari terbesar) dengan kurva persentase kumulatifnya. Diagram ini secara langsung menegaskan prinsip *Pareto* (80/20) sebagai landasan utama penetapan prioritas dalam audit energi berbasis SEU.



**Gambar 7.** Diagram *Pareto Significant Energy Use* (SEU) PLTU Stoker Unit 3

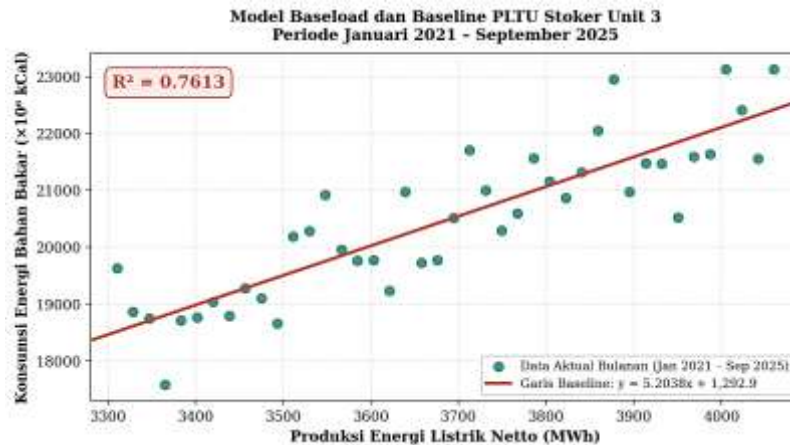
Berdasarkan Gambar 7, terlihat bahwa enam peralatan pertama, yaitu *Circulating Water Pump* (CWP) 3, CWP 2, *Boiler Feed Pump* (BFP) B, CWP 4, *Induced Draft Fan* (IDF) B dan IDF A, secara kumulatif telah menyumbang 73,3% dari total daya pemakaian sendiri. Kurva kumulatif memperlihatkan kemiringan yang curam pada keenam peralatan tersebut, kemudian melandai secara bertahap pada peralatan berikutnya. Pola ini mengonfirmasi bahwa distribusi konsumsi energi bersifat tidak merata dan terkonsentrasi pada sejumlah kecil peralatan, sehingga keenam peralatan yang tergolong SEU utama (batang berwarna hijau gelap) tersebut menjadi sasaran prioritas dalam program efisiensi energi dan pemeliharaan prediktif. Sebaliknya, tujuh peralatan sisanya yang tergolong SEU sekunder (batang berwarna hijau terang) hanya memberikan kontribusi individual di bawah 9% dengan total di bawah 27%, sehingga upaya perbaikan pada kelompok ini memberikan dampak penghematan yang relatif kecil. Dengan demikian, diagram *pareto* ini tidak hanya berfungsi sebagai alat identifikasi, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan agar sumber daya audit dan intervensi teknis dapat dialokasikan secara efisien pada peralatan yang paling berpengaruh terhadap konsumsi energi pemakaian sendiri.

### 3.4 Energy Baseload dan Baseline

Analisis regresi *linear* antara variabel produksi energi *netto* (X) dan konsumsi energi bahan bakar (Y) selama periode Januari 2021-September 2025 menghasilkan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,7613. Nilai ini berada di atas ambang batas korelasi yang dipersyaratkan oleh UNIDO (2014) yaitu  $R^2$  lebih besar dari 0,7, sehingga model regresi dapat digunakan sebagai acuan *baseline* kinerja energi pembangkit. Persamaan garis *baseline* yang diperoleh, sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 8, adalah sebagai berikut:

$$\text{Konsumsi energi bahan bakar } (\times 10^6 \text{ kCal}) = [5,2038 \times \text{Produksi Listrik Netto (MWh)}] + 1.292,9$$

Nilai *baseload* PLTU Stoker Unit 3 yang diperoleh dari laporan audit energi tercatat sebesar  $4.319,4 \times 10^6$  kCal, sedangkan titik potong persamaan garis *baseline* dengan sumbu Y (pada  $X = 0$ ) bernilai  $1.292,9 \times 10^6$  kCal. Nilai *baseload* tersebut merepresentasikan kebutuhan energi minimum yang tetap dikonsumsi pembangkit meskipun tidak sedang memproduksi listrik, misalnya pada kondisi *standby* maupun untuk mengoperasikan peralatan bantu dasar.



**Gambar 8.** Regresi Linear *Baseline* Konsumsi Energi terhadap Produksi Listrik *Netto*

Gambar 8 memvisualisasikan hubungan antara produksi energi listrik *netto* (sumbu X) dan konsumsi energi bahan bakar (sumbu Y) selama periode Januari 2021 - September 2025. Sebaran titik data aktual bulanan menunjukkan pola *linear* yang jelas, di mana peningkatan produksi listrik diikuti oleh kenaikan konsumsi bahan bakar. Garis *baseline* hasil regresi memiliki kemiringan (*slope*) sebesar 5,2038 yang merepresentasikan kebutuhan energi marginal untuk setiap penambahan 1 MWh produksi *netto*, dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,7613 yang mengonfirmasi bahwa model regresi cukup andal digunakan sebagai acuan kinerja energi pembangkit. Nilai *baseload* PLTU Stoker Unit 3 tercatat sebesar  $4.319,4 \times 10^6$  kCal. Nilai ini merepresentasikan kebutuhan energi minimum yang tetap dikonsumsi pembangkit meskipun tidak sedang memproduksi listrik, misalnya pada kondisi *standby* maupun untuk mengoperasikan peralatan bantu dasar. Keberadaan *baseload* yang relatif tinggi ini menegaskan pentingnya optimasi *auxiliary power* dan peralatan penunjang sebagaimana dibahas pada analisis SEU sebelumnya.

### 3.5 Measurement and Verification Energy (M&V)

Hasil verifikasi kinerja energi tahunan dengan membandingkan konsumsi bahan bakar aktual terhadap nilai *baseline* (*expected*) ditunjukkan pada Tabel 6. Nilai tanpa kurung menunjukkan konsumsi aktual lebih rendah dari *baseline* (terjadi *energy saving*), sedangkan nilai dalam kurung menunjukkan konsumsi aktual lebih tinggi dari *baseline* (terjadi *energy loss*).

**Tabel 6.** Hasil M&V Tahunan

| Tahun          | Baseline ( $\times 10^6$ kCal) | Aktual ( $\times 10^6$ kCal) | Saving/(Loss) |
|----------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|
| 2021           | 218.200,5                      | 219.055,6                    | (0,39%)       |
| 2022           | 203.760,6                      | 230.840,9                    | (11,73%)      |
| 2023           | 207.826,5                      | 225.130,4                    | (7,69%)       |
| 2024           | 228.644,6                      | 183.773,8                    | 24,42%        |
| 2025 (s.d Sep) | 173.695,8                      | 142.759,2                    | 21,67%        |

Tabel 6 memperlihatkan pola perbaikan kinerja energi yang jelas: pada periode 2021-2023 pembangkit secara konsisten mengonsumsi bahan bakar di atas *baseline* (defisit efisiensi 0,39%-11,73%), yang sejalan dengan temuan *gap heat rate* berupa anomali tekanan vakum kondensor dan tingginya *auxiliary power* pada periode tersebut. Namun pada 2024 dan 2025 terjadi pembalikan tren menjadi *energy saving* sebesar 24,42% dan 21,67%, yang mengindikasikan bahwa intervensi pemeliharaan dan optimasi operasi yang dilakukan manajemen pembangkit mulai memberikan dampak signifikan. Secara kumulatif, total *energy saving* bersih periode 2021-2025 mencapai  $30.567,98 \times 10^6$  kCal.

### 3.6 Evaluasi Efisiensi Boiler

*Performance test* dilaksanakan pada empat variasi pembebanan (3,8 MW; 5,2 MW; 6,2 MW; dan 6,8 MW) dengan berpedoman pada standar ASME PTC 4-2013. Tabel 7 menyajikan hasil analisis efisiensi *boiler* berdasarkan metode *langsumg* (*input-output*).

**Tabel 7.** Hasil Analisis Efisiensi *Boiler* pada Seluruh Beban

| Parameter                       | 3,8MW  | 5,2MW  | 6,2MW   | 6,8MW   |
|---------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| Efisiensi <i>Boiler</i> HHV (%) | 81,21  | 81,97  | 81,94   | 82,95   |
| Kalor Batubara (kCal/kg)        | 3.682  | 3.629  | 3.624   | 3.615   |
| Konsumsi Batubara (kg/jam)      | 6.185  | 6.758  | 8.745   | 10.000  |
| <i>Heat Input</i> (MJ/jam)      | 66.212 | 87.770 | 109.727 | 121.773 |
| <i>Heat Output</i> (MJ/jam)     | 53.773 | 71.944 | 89.909  | 101.010 |



Efisiensi *boiler* menunjukkan tren positif terhadap kenaikan beban, dari 81,21% pada beban terendah menjadi 82,95% pada beban penuh, seiring penurunan kadar oksigen *inlet* dan *outlet air preheater* (APH) yang mengindikasikan proses pembakaran yang lebih sempurna pada beban tinggi. Hasil dekomposisi *losses* dengan metode tidak langsung (*heat loss method*) pada beban 6,8 MW (Tabel 8) memperlihatkan bahwa tiga kontributor kerugian panas terbesar berasal dari panas dalam gas buang kering ( $L1 = 6,83\%$ ), kelembaban dalam bahan bakar ( $L2 = 6,79\%$ ), dan kelembaban akibat pembakaran hidrogen ( $L3 = 4,51\%$ ), yang secara kumulatif menyumbang lebih dari 18% dari total energi masuk berbasis HHV.

**Tabel 8.** Rincian *Heat Loss Boiler* Beban 6,8 MW (ASME PTC 4-2013)

| Komponen <i>Losses</i>               | kJ/kg-bb | % HHV |
|--------------------------------------|----------|-------|
| L1 - <i>Heat in Dry Flue Gas</i>     | 1.034,10 | 6,83% |
| L2 - <i>Moisture in Fuel</i>         | 1.028,25 | 6,79% |
| L3 - <i>Moisture from H Burning</i>  | 682,45   | 4,51% |
| L4 - <i>Moisture in Air</i>          | 49,59    | 0,33% |
| L5 - <i>Combustible in Refuse</i>    | 2,21     | 0,01% |
| L6 - <i>Surface Radiation</i>        | 78,70    | 0,52% |
| L8 - <i>Sensible Heat Bottom Ash</i> | 5,61     | 0,04% |
| L9 - <i>Sensible Heat Fly Ash</i>    | 0,00     | 0,03% |

Dominasi *losses* dari kelembaban bahan bakar dan gas buang ini konsisten dengan hasil analisis proksimat batubara aktual yang menunjukkan kadar air total (*total moisture*) sebesar 38,78%, lebih tinggi dari spesifikasi desain sebesar 36%. Hal ini menegaskan bahwa strategi peningkatan efisiensi *boiler* sebaiknya difokuskan pada manajemen kadar air bahan bakar dan optimalisasi pemulihan panas pada *air heater*.

### 3.7 Evaluasi Kinerja Turbin dan Kondensor

Tabel 9 merangkum parameter *heat rate* dan efisiensi *High Pressure Turbine* (HPT) pada keempat beban pengujian.

**Tabel 9.** Hasil *Performance Test* Turbin dan Kondensor

| Parameter                                          | 3,8MW   | 5,2MW   | 6,2MW   | 6,8MW   |
|----------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| <i>Turbine Heat Rate</i> (kCal/kWh)                | 3.862,8 | 3.924,4 | 3.583,7 | 3.550,8 |
| NPHR <i>Heat Loss</i> (kCal/kWh)                   | 5.860,9 | 5.531,6 | 4.951,3 | 4.781,9 |
| Efisiensi HPT (%)                                  | 53,07   | 47,71   | 47,92   | 46,52   |
| <i>Cond. Actual HT</i> (kCal/m <sup>3</sup> .h.°C) | 872,3   | 1.237,1 | 1.024,5 | 989,1   |
| <i>Cond. Design HT</i> (kCal/m <sup>3</sup> .h.°C) | 1.496,9 | 1.602,7 | 1.530,2 | 1.526,3 |
| <i>Cleanliness Factor</i> (%)                      | 58,27   | 77,19   | 66,95   | 64,81   |

Hasil pengujian menunjukkan fenomena yang relatif tidak lazim namun signifikan: efisiensi HPT justru menurun dari 53,07% pada beban rendah (3,8 MW) menjadi hanya 46,52% pada beban penuh (6,8 MW), berbanding terbalik dengan efisiensi *boiler* yang meningkat pada beban tinggi. Penurunan ini berkorelasi langsung dengan rendahnya *Condenser Cleanliness Factor* (CF) yang hanya mencapai 64,81% pada beban penuh, jauh di bawah ambang optimal ( $\geq 85\%$ ). CF yang rendah mengindikasikan adanya *fouling* atau *scaling* pada permukaan perpindahan panas kondensor, yang menyebabkan tekanan *back-end* turbin meningkat dan ekspansi uap pada tingkat akhir turbin tidak dapat berlangsung optimal.

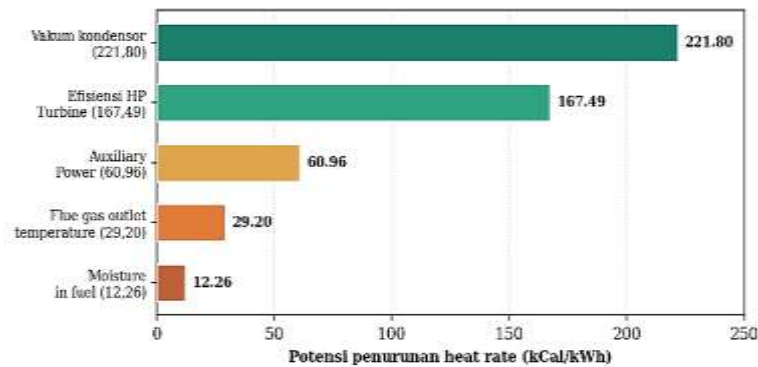
Temuan ini selaras dengan Ramesh *et al.* (2017) yang menyatakan bahwa pembersihan kondensor secara berkala terbukti efektif menurunkan konsumsi uap turbin dan meningkatkan efisiensi siklus secara keseluruhan. Hubungan antara performa kondensor dan efisiensi turbin pada penelitian ini memperkuat argumen bahwa evaluasi audit energi PLTU sebaiknya tidak memisahkan analisis termal turbin dari kondisi sistem pendingin, sebagaimana menjadi kritik utama terhadap pendekatan audit energi parsial yang disampaikan pada bagian Pendahuluan.

### 3.8 Analisis Gap Heat Rate

Analisis *gap heat rate* menyandingkan NPHR aktual hasil *performance test* pada beban penuh (100%) dengan NPHR terbaik (referensi *commissioning*) yang pernah diraih unit. Dekomposisi total *gap* sebesar 668,33 kCal/kWh ke dalam kontribusi tiap parameter disajikan melalui Tabel 10 dan Gambar 9.

**Tabel 10.** Dekomposisi *Gap Heat Rate* (Referensi vs Aktual Beban Penuh)

| Parameter                       | Ref    | Aktual | Losses (kCal/kWh) | Kategori |
|---------------------------------|--------|--------|-------------------|----------|
| <i>Condenser Vacuum</i> (mmHgA) | 72,48  | 180,32 | 221,80            | Unit     |
| Efisiensi HPT (%)               | 69,14  | 46,52  | 167,49            | Turbin   |
| <i>Auxiliary Power</i> (%)      | 9,52   | 11,00  | 60,96             | Unit     |
| <i>Flue Gas Outlet</i> (°C)     | 143,78 | 154,93 | 29,20             | Operator |
| <i>Moisture in Fuel</i> (%)     | 35,80  | 38,78  | 12,26             | Boiler   |



**Gambar 9.** Diagram Kontribusi *Gap Heat Rate* Berdasarkan Parameter Penyebab

Dari kelima parameter signifikan tersebut, deviasi tekanan vakum kondensor dan penurunan efisiensi HPT menjadi dua kontributor terbesar, secara kumulatif menyumbang lebih dari 58% dari total *gap heat rate*. Hasil ini konsisten dengan temuan (Yohanes et al., 2024) pada audit energi PLTU Pelabuhan Ratu Unit 2 (350 MW) yang juga mengidentifikasi deviasi NPHR aktual terhadap *baseline* dengan kerugian ekonomi signifikan, serta menegaskan bahwa kondisi peralatan utama (*boiler*, turbin, kondensor, dan *feedwater system*) merupakan determinan utama *gap* performa di PLTU berbahan bakar batubara. Perbedaan skala kapasitas (350 MW vs 7 MW) menunjukkan bahwa permasalahan vakum kondensor dan degradasi efisiensi turbin bersifat umum pada PLTU batubara, terlepas dari ukuran unit.

### 3.9 Evaluasi Sistem Kelistrikan pada *Auxiliary Power*

Pengukuran beban pada peralatan *auxiliary* menggunakan *Power Quality Meter* (PQM) menunjukkan bahwa total *auxiliary power* PLTU Stoker Unit 3 tercatat sebesar 11,00%, berada di atas nilai target manajemen sebesar 9,52%, sehingga berkontribusi terhadap *gap heat rate* sebesar 60,96 kCal/kWh sebagaimana telah dibahas pada Tabel 10. Kondisi ini sejalan dengan temuan Legino et al. (2017) pada PLTU Muara Karang yang juga menyoroti pentingnya audit energi terhadap motor pemakaian sendiri untuk menjaga rasio *own-used* pada batas yang ditetapkan oleh kontrak kinerja perusahaan, meskipun ambang batas spesifik berbeda menurut konfigurasi dan kapasitas masing-masing unit.

Hasil pengujian kualitas daya listrik (*Total Harmonic Distortion* dan ketidakseimbangan tegangan/arus) terhadap 13 peralatan *auxiliary* dirangkum pada Tabel 11.

**Tabel 11.** Ringkasan Hasil Pengukuran Kualitas Daya pada Peralatan *Auxiliary*

| Parameter       | Standar             | Min  | Maks | Ket.   |
|-----------------|---------------------|------|------|--------|
| THD-V (%)       | ≤5% IEEE519         | 0,93 | 1,50 | Sesuai |
| THD-A (%)       | Rasio <i>Isc/IL</i> | 1,15 | 3,83 | Sesuai |
| Unbalance V (%) | ≤1% NEMA            | 0,17 | 0,85 | Sesuai |
| Unbalance A (%) | ≤5% NEMA            | 1,16 | 7,22 | 2 alat |

Kualitas tegangan secara keseluruhan tergolong baik; nilai THD-V maupun *unbalance* tegangan berada jauh di bawah ambang standar IEEE 519-2014 dan NEMA MG1-2016. Meski demikian, teridentifikasi dua peralatan dengan ketidakseimbangan arus (*unbalance current*) melebihi 5%, yakni *Cooling Tower Fan* (CTF) 4 sebesar 5,12% dan *Circulating Water Pump* (CWP) 4 sebesar 7,22% sebagai nilai tertinggi. Arus yang tidak seimbang pada level tersebut dapat memicu panas berlebih pada motor, memperbesar rugi-rugi energi, dan memperpendek umur isolasi belitan motor; oleh sebab itu evaluasi distribusi beban antar fasa pada peralatan dimaksud perlu dilakukan.

### 3.10 Evaluasi Vibrasi pada Peralatan Utama

Pengukuran vibrasi terhadap 22 titik peralatan utama dan *auxiliary* mengacu pada standar ISO 20816-2 (turbin dan generator) dan ISO 20816-3 (peralatan *rotary* industri umum). Ringkasan hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 12.

**Tabel 12.** Ringkasan Hasil Pengukuran Vibrasi pada Peralatan Utama

| Peralatan                       | Titik                       | mm/s      | Kategori ISO             |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------|--------------------------|
| Turbin Unit 3                   | <i>Outboard</i> H           | 1,151     | <i>Good</i>              |
| Generator Unit 3                | <i>Outboard</i> H           | 2,231     | <i>Good</i>              |
| <i>Boiler Feed Pump</i> B       | Motor <i>Outboard</i> V     | 2,645     | <i>Satisfactory</i>      |
| <i>Condensate Extr. Pump</i> B  | <i>Pump Outboard</i> Aksial | 8,893     | <i>Unsatisfactory</i>    |
| <i>Circulating Water Pump</i> B | <i>Pump Outboard</i> H      | 6,177     | <i>Unsatisfactory</i>    |
| <i>Circulating Water Pump</i> C | <i>Pump Inboard</i> Aksial  | 6,640     | <i>Unsatisfactory</i>    |
| <i>Circulating Water Pump</i> A | <i>Pump Outboard</i> V      | 4,131     | <i>Satisfactory</i>      |
| 14 peralatan lainnya            | Bervariasi                  | 0,45-3,02 | <i>Good/Satisfactory</i> |



Dari 22 peralatan yang diperiksa, mayoritas (19 peralatan) berada pada kategori *Good* dan *Satisfactory* menurut ISO 20816, namun tiga peralatan menunjukkan kondisi *Unsatisfactory* yang memerlukan tindakan korektif segera: *Condensate Extraction Pump* (CEP) B dengan vibrasi aksial 8,893 mm/s, serta *Circulating Water Pump* (CWP) B dan C dengan vibrasi 6,177 mm/s dan 6,640 mm/s. Mengingat ketiga peralatan tersebut berperan langsung dalam sistem kondensasi dan sirkulasi air pendingin, temuan ini memperkuat korelasi antara kondisi kehandalan mekanis peralatan *auxiliary* dengan rendahnya *Condenser Cleanliness Factor* yang dibahas pada Tabel 9, sehingga gangguan vibrasi pada pompa-pompa tersebut patut diduga turut berkontribusi terhadap penurunan kinerja sistem pendinginan kondensor.

### 3.11 Evaluasi *Infrared Thermography* pada Peralatan Utama

Pemeriksaan kondisi termal menggunakan *thermal imager camera* dievaluasi berdasarkan standar *NETA Maintenance Testing Specification* (Tabel 3) yang mengklasifikasikan tingkat keparahan berdasarkan selisih suhu ( $\Delta T$ ) terhadap suhu lingkungan ke dalam 4 tingkat prioritas. Hasil pemeriksaan pada peralatan kritis dirangkum pada Tabel 13.

**Tabel 13.** Ringkasan Hasil Pemeriksaan *Infrared Thermography* pada Peralatan Kritis

| Peralatan            | Titik Ukur           | $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ | Prioritas |
|----------------------|----------------------|------------------------------|-----------|
| STG #3               | Bearing Turbin NDE   | 51,7                         | 1         |
| STG #3               | Bearing Generator DE | 20,3                         | 2-3       |
| Cooling Tower Fan C  | Body Motor           | 40,3                         | 1         |
| Boiler Feed Pump B   | Bearing Pompa NDE    | 33,7                         | 2         |
| Coal Spreader A-D    | Bearing Motor DE     | 16,1-30,5                    | 2-3       |
| IDF 3A/3B, PAF 3A/3B | Bearing Motor/Fan    | 4,2-30,3                     | 2-4       |

Temuan paling kritis berada pada *Steam Turbine Generator* #3 dengan  $\Delta T$  bearing turbin sisi NDE sebesar 51,7°C (Prioritas 1) dan *Cooling Tower Fan* C dengan  $\Delta T$  body motor sebesar 40,3°C (Prioritas 1), yang menurut klasifikasi NETA memerlukan tindakan korektif segera untuk mencegah risiko kegagalan mendadak. Sejalan dengan hasil evaluasi vibrasi, temuan termal pada peralatan sistem pendingin (*cooling tower fan*) turut memperkuat indikasi bahwa subsistem pendinginan PLTU Stoker Unit 3 menjadi area kritis yang paling mendesak untuk ditindaklanjuti dalam program pemeliharaan prediktif.

### 3.12 Peluang Penghematan Energi

Berdasarkan hasil dekomposisi *gap heat rate* pada Tabel 10 dan Gambar 9, dilakukan kuantifikasi potensi penghematan energi dan nilai ekonomisnya dengan mengacu pada produksi energi *gross* PLTU Stoker Unit 3 tahun 2025 (34.883.370 kWh) dan Harga Batubara Acuan (HBA) sebesar 70 USD/ton dengan kurs Rp16.500/USD. Rincian lengkap potensi penghematan ditunjukkan pada Tabel 14.

**Tabel 14.** Peluang Penghematan Energi dan Nilai Ekonomis

| Peluang Penghematan  | kCal/kWh | GJ/thn   | ton bb  | Rp juta/thn |
|----------------------|----------|----------|---------|-------------|
| Vakum kondensor      | 221,80   | 32.372,1 | 1.983,0 | 2.290,33    |
| Efisiensi HP Turbine | 167,49   | 24.445,1 | 1.497,4 | 1.729,49    |
| PS/Aux. Power        | 60,96    | 8.897,6  | 545,0   | 629,51      |
| Flue gas outlet temp | 29,20    | 4.261,2  | 261,0   | 301,48      |
| Moisture in fuel     | 12,26    | 1.789,1  | 109,6   | 126,58      |
| Total                | -        | 71.765,1 | 4.396,0 | 5.077,39    |

Total peluang penghematan energi yang teridentifikasi mencapai 71.765,11 GJ/tahun atau setara 1.714 TOE/tahun, dengan nilai ekonomis sebesar Rp5.077.394.462,83 ( $\approx$  Rp5,08 miliar) per tahun. Perbaikan tekanan vakum kondensor dan efisiensi HPT menyumbang lebih dari 79% dari total nilai ekonomis tersebut, menegaskan bahwa kedua aspek ini merupakan prioritas utama dalam rencana kerja efisiensi energi. Dibandingkan dengan hasil (Yohanes et al., 2024) di PLTU Pelabuhan Ratu Unit 2 yang mengidentifikasi potensi penurunan NPHR senilai puluhan miliar rupiah per tahun pada unit berkapasitas 350 MW, nilai ekonomis pada PLTU Stoker Unit 3 yang berkapasitas jauh lebih kecil (7 MW) secara proporsional menunjukkan signifikansi yang sebanding apabila dinormalisasi terhadap kapasitas terpasang, mengindikasikan bahwa potensi kehilangan energi akibat penurunan kinerja peralatan utama bersifat sistemik dan tidak ditentukan oleh skala kapasitas unit (Matthee et al., 2024).

### 3.13 Pembahasan

Mayoritas peluang penghematan tersebut - terutama pemulihan vakum kondensor lewat inspeksi *labyrinth seal* dan pembersihan area kondensor, serta optimasi *auxiliary power* melalui pengendalian arus motor - masuk kategori *low-cost intervention* karena tidak menuntut investasi modal besar, melainkan kedisiplinan yang lebih baik dalam praktik operasi dan pemeliharaan rutin. Berdasarkan hasil audit energi pada PLTU Stoker Unit 3 selama periode Januari 2021 hingga September 2025, kinerja energi pembangkit menunjukkan kondisi yang fluktuatif. Variasi konsumsi bahan bakar, produksi energi listrik, kondisi peralatan utama, serta perubahan komposisi bahan bakar menjadi faktor yang memengaruhi performa unit. Batubara masih menjadi sumber energi primer utama, meskipun pemanfaatan biomassa



berupa cangkang dan *woodchip* mengalami peningkatan terutama sejak tahun 2023 (Mahaputra, 2021). Secara kumulatif, komposisi bahan bakar terdiri atas 87,3% batubara, 11,3% cangkang sawit, dan 1,4% *woodchip*. Peningkatan pemanfaatan biomassa menunjukkan adanya penerapan *co-firing* sebagai bagian dari diversifikasi sumber energi pembangkit. Di sisi lain, sebesar 88,2% produksi listrik gross dapat disalurkan sebagai energi netto, sedangkan 11,8% digunakan untuk memenuhi kebutuhan pemakaian sendiri. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa konsumsi *auxiliary power* masih menjadi salah satu aspek penting yang perlu dioptimalkan (Sihombing et al., 2024; Wahyudi & Yuriadi Kusuma, 2023). Kinerja termal pembangkit yang ditinjau melalui indikator *Net Plant Heat Rate* (NPHR) memperlihatkan adanya fluktuasi yang cukup besar. Rata-rata NPHR selama periode pengamatan mencapai 4.495,72 kCal/kWh, dengan kinerja terbaik sebesar 3.365,02 kCal/kWh pada Desember 2023, sedangkan kondisi terburuk mencapai 6.438,88 kCal/kWh pada Juni 2023. Fluktuasi tersebut mengindikasikan bahwa efisiensi pembangkit sangat dipengaruhi oleh mutu bahan bakar, kestabilan operasi, dan kondisi peralatan utama, khususnya boiler, turbin, serta kondensor (Hamzah et al., 2021). Dengan demikian, peningkatan NPHR tidak dapat hanya dikaitkan dengan satu peralatan, tetapi merupakan konsekuensi dari interaksi berbagai subsistem dalam siklus pembangkitan listrik (Herlin Sumarna et al., 2026). Hasil pemetaan *Significant Energy Use* (SEU) menunjukkan bahwa konsumsi energi pemakaian sendiri terkonsentrasi pada sejumlah peralatan tertentu. Enam peralatan utama, yaitu CWP 3, CWP 2, BFP B, CWP 4, IDF B, dan IDF A, secara kumulatif menyumbang sekitar 73,3% dari total konsumsi energi peralatan yang diukur. Pola tersebut menunjukkan bahwa peluang peningkatan efisiensi tidak perlu dilakukan secara merata pada seluruh peralatan, melainkan dapat diprioritaskan pada peralatan dengan kontribusi energi terbesar (Aldyia Putra & Nazir, 2023). Pendekatan SEU menjadi penting karena memungkinkan program pemeliharaan dan optimasi diarahkan pada peralatan yang memiliki pengaruh paling besar terhadap konsumsi energi pembangkit (Alfarisi et al., 2024).

Analisis *energy baseline* menunjukkan hubungan yang cukup kuat antara produksi energi listrik netto dan konsumsi bahan bakar, dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,7613. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model regresi dapat digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi perubahan kinerja energi (Moioli & Schildhauer, 2022). Persamaan baseline juga menunjukkan adanya kebutuhan energi tetap atau *baseload*, yang tetap dikonsumsi pembangkit meskipun produksi listrik menurun. Kondisi ini memperkuat pentingnya pengendalian operasi peralatan bantu, terutama pada kondisi beban rendah dan *standby*, karena konsumsi energi yang tidak secara langsung menghasilkan energi netto dapat meningkatkan NPHR secara signifikan. Hasil *measurement and verification* (M&V) memperlihatkan adanya perubahan tren kinerja energi. Pada periode 2021 hingga 2023, konsumsi bahan bakar aktual masih berada di atas baseline, yang menunjukkan terjadinya *energy loss*. Kondisi tersebut kemudian membaik pada tahun 2024 dan 2025, dengan pencapaian penghematan energi sebesar 24,42% dan 21,67%. Perubahan tersebut mengindikasikan bahwa kegiatan pemeliharaan dan optimasi operasi mulai memberikan dampak positif terhadap efisiensi pembangkit. Namun demikian, hasil ini tetap menunjukkan perlunya pengendalian yang konsisten agar peningkatan kinerja energi dapat dipertahankan secara berkelanjutan (Siregar et al., 2021). Evaluasi boiler menunjukkan bahwa efisiensi meningkat seiring kenaikan beban. Efisiensi boiler tertinggi sebesar 82,95% diperoleh pada beban 6,8 MW, sedangkan pada beban 3,8 MW efisiensinya sebesar 81,21%. Meskipun demikian, hasil analisis *heat loss* menunjukkan bahwa kerugian panas terbesar berasal dari panas gas buang kering sebesar 6,83%, kelembaban bahan bakar sebesar 6,79%, dan kelembaban akibat pembakaran hidrogen sebesar 4,51%. Tingginya kehilangan panas akibat kelembaban berkaitan dengan kadar air bahan bakar aktual sebesar 38,78%, yang melebihi spesifikasi desain sebesar 36%. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi boiler perlu difokuskan pada pengendalian kualitas bahan bakar dan optimasi sistem pemanfaatan panas, terutama pada *air preheater*. Permasalahan paling dominan ditemukan pada sistem turbin dan kondensor. Efisiensi HPT pada beban penuh hanya mencapai 46,52%, jauh lebih rendah dibandingkan nilai referensi *commissioning* sebesar 69,14%. Kondisi tersebut disertai *Condenser Cleanliness Factor* sebesar 64,81%, yang berada di bawah kondisi optimal dan mengindikasikan kemungkinan terjadinya *fouling* atau *scaling* pada permukaan perpindahan panas. Penurunan kinerja sistem pendinginan menyebabkan proses kondensasi uap tidak berlangsung optimal, sehingga meningkatkan tekanan balik turbin dan menurunkan kemampuan ekspansi uap (Alkahfi S et al., 2024). Temuan ini menunjukkan adanya hubungan langsung antara kondisi kondensor dan penurunan efisiensi turbin (Ariyandi et al., 2024).

Analisis *gap heat rate* memperkuat hasil tersebut. Dari total kerugian sebesar 668,33 kCal/kWh, deviasi tekanan vakum kondensor memberikan kontribusi terbesar sebesar 221,80 kCal/kWh, diikuti penurunan efisiensi HPT sebesar 167,49 kCal/kWh. Kedua parameter tersebut secara kumulatif menyumbang lebih dari 58% terhadap total *gap heat rate*. Sementara itu, *auxiliary power* sebesar 11,00% memberikan kontribusi kerugian sebesar 60,96 kCal/kWh. Dengan demikian, perbaikan sistem kondensor dan turbin harus ditempatkan sebagai prioritas utama dalam strategi peningkatan efisiensi energi pembangkit. Dari sisi sistem kelistrikan, kualitas tegangan secara umum masih memenuhi standar, karena nilai THD tegangan dan ketidakseimbangan tegangan berada dalam batas yang dapat diterima (Indramaulana, 2026). Namun, ditemukan ketidakseimbangan arus yang melebihi batas pada beberapa peralatan, terutama CWP 4 yang mencapai 7,22%. Ketidakseimbangan arus dapat menyebabkan peningkatan temperatur motor, memperbesar rugi-rugi listrik, serta mempercepat penurunan kualitas isolasi. Oleh sebab itu, evaluasi distribusi beban antar fasa dan pemeriksaan kondisi motor perlu menjadi bagian dari program pemeliharaan preventif (Hutabarat et al., 2022). Hasil evaluasi vibrasi dan *infrared thermography* semakin memperjelas bahwa sistem pendinginan merupakan area kritis. CEP B serta CWP B dan C berada pada kategori *Unsatisfactory*, sedangkan pemeriksaan termal menunjukkan kondisi kritis pada bearing turbin dan motor Cooling Tower Fan C dengan kategori prioritas 1. Kondisi mekanis dan termal tersebut berpotensi mengganggu kinerja sistem sirkulasi air dan perpindahan panas, sehingga dapat memperburuk



kinerja kondensor (Setiawan et al., 2022). Dengan demikian, temuan audit tidak hanya menunjukkan adanya pemborosan energi, tetapi juga mengidentifikasi keterkaitan antara penurunan efisiensi energi dan penurunan keandalan peralatan (Jamal et al., 2020).

Secara keseluruhan, peluang penghematan energi terbesar berasal dari pemulihan vakum kondensor, peningkatan efisiensi HPT, dan pengurangan konsumsi *auxiliary power*. Total potensi penghematan mencapai 71.765,11 GJ/tahun dengan nilai ekonomis sekitar Rp5,08 miliar per tahun. Lebih dari 79% nilai penghematan tersebut berasal dari perbaikan vakum kondensor dan efisiensi HPT. Oleh karena itu, prioritas perbaikan sebaiknya diarahkan pada pembersihan dan optimasi sistem kondensor, evaluasi sistem pendinginan, peningkatan performa turbin, pengendalian peralatan SEU, serta pemeliharaan prediktif pada peralatan yang menunjukkan anomali vibrasi dan temperatur. Sebagian besar tindakan tersebut dapat dilakukan melalui optimalisasi operasi dan pemeliharaan rutin tanpa memerlukan investasi modal yang besar (Alber & Kiono, 2022).

Secara umum, hasil penelitian membuktikan bahwa pendekatan audit energi berbasis SEU mampu memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai sumber penurunan efisiensi pembangkit. Integrasi analisis termal, mekanikal, elektrik, dan keandalan peralatan memungkinkan identifikasi hubungan antara tingginya NPHR, konsumsi *auxiliary power*, degradasi sistem pendinginan, dan kondisi peralatan utama (Pelser et al., 2022). Dengan pendekatan tersebut, rekomendasi perbaikan dapat disusun berdasarkan tingkat kontribusi terhadap kerugian energi, sehingga pelaksanaan program efisiensi menjadi lebih terarah dan berpotensi memberikan manfaat teknis maupun ekonomis yang signifikan.

#### 4. KESIMPULAN

Audit energi mekanikal dan elektrik berbasis *Significant Energy Use* (SEU) pada PLTU Stoker Unit 3 menunjukkan bahwa kinerja termal mengalami fluktuasi sepanjang Januari 2021 hingga September 2025, dengan rerata *Net Plant Heat Rate* (NPHR) sebesar 4.495,72 kCal/kWh dan capaian terbaik 3.365,02 kCal/kWh pada Desember 2023. Hasil *performance test* pada beban penuh 6,8 MW mengidentifikasi dua sumber utama degradasi, yaitu efisiensi *High Pressure Turbine* (HPT) sebesar 46,52% dibandingkan referensi *commissioning* 69,14% serta tekanan vakum kondensor sebesar 180,32 mmHgA dibandingkan nilai desain 72,48 mmHgA, yang didukung oleh *Condenser Cleanliness Factor* sebesar 64,81% dan mengindikasikan adanya *fouling* pada sistem pendingin. Konsumsi daya pemakaian sendiri juga mencapai 11,00%, melebihi target manajemen sebesar 9,52%, dengan kelompok SEU *Circulating Water Pump*, *Boiler Feed Pump*, dan *Induced Draft Fan* menyumbang lebih dari 73% total pemakaian sendiri. Analisis *gap heat rate* menunjukkan bahwa penyimpangan tekanan vakum kondensor dan penurunan efisiensi HPT merupakan kontributor terbesar terhadap kerugian *heat rate* sebesar 668,33 kCal/kWh, masing-masing sebesar 221,80 kCal/kWh dan 167,49 kCal/kWh. Hasil tersebut diperkuat oleh evaluasi kehandalan peralatan yang menemukan kondisi *Unsatisfactory* pada *Condensate Extraction Pump B*, *Circulating Water Pump B*, dan C berdasarkan pengukuran vibrasi, serta kondisi suhu kritis Prioritas 1 menurut standar NETA pada *bearing* turbin *Steam Turbine Generator* dan motor *Cooling Tower Fan C* berdasarkan *infrared thermography*. Keterkaitan temuan tersebut menunjukkan bahwa subsistem pendinginan dan sirkulasi air, khususnya kondensor, CWP, dan *cooling tower*, menjadi area paling kritis dan berperan sebagai akar penyebab utama penurunan efisiensi unit, sedangkan parameter harmonisa dan ketidakseimbangan tegangan masih memenuhi standar *IEEE 519-2014* dan *NEMA MG1-2016*, kecuali ketidakseimbangan arus pada tiga peralatan *auxiliary*. Lima peluang utama penghematan energi kemudian dipetakan berdasarkan potensi penurunan *heat rate*, meliputi perbaikan tekanan vakum kondensor, peningkatan efisiensi HPT, pengurangan *auxiliary power*, penurunan temperatur gas buang, dan pengurangan kadar kelembaban bahan bakar, dengan total potensi penghematan sebesar 71.765,11 GJ/tahun atau setara 1.714 TOE/tahun dan nilai ekonomis Rp5.077.394.462,83 per tahun. Sebagian besar peluang tersebut tergolong intervensi *low-cost* karena berfokus pada optimalisasi operasi dan pemeliharaan tanpa memerlukan investasi modal yang besar, sehingga layak diterapkan dalam jangka pendek. Secara keseluruhan, audit energi rinci berbasis SEU yang mengintegrasikan analisis termal mekanikal, kelistrikan, dan kehandalan peralatan secara simultan terbukti efektif dalam mengidentifikasi sumber pemborosan energi pada PLTU tipe stoker dan menghasilkan rekomendasi teknis yang implementatif untuk menurunkan NPHR, menekan Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik.

#### REFERENCES

- Adytia Putra, R., & Nazir, R. (2023). Power Plant Performance Analysis on Variations of Generator Loading at Ombilin Coal Fired Steam Power Plant Unit 1 (2x100 MW). *Andalasian International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 3(2). <https://doi.org/10.25077/aijaset.v3i2.58>
- Alber, I. D., & Kiono, B. F. T. (2022). Analisis Pengaruh Perubahan Pembebanan Listrik Terhadap Konsumsi Spesifik Bahan Bakar Pembangkitan, Heat Rate dan Efisiensi Pada Unit 1 PLTU Kendari-3. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(3), 179–186. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13371>
- Alfarisi, D. I., Rumawan, F. H., & Wirawan, A. P. (2024). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Konsumsi Batubara, Heat Rate Dan Efisiensi Termal Pltu Indoeka Unit 1. *ELECTROPS: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 3(2), 10. <https://doi.org/10.30872/electrops.v3i2.16576>



- Alkafhi S, A. Muh., Fiyana, L., Nawir, M., Nojeng, S., & Syarifuddin, A. (2024). Analisis Pengaruh Perubahan Pembebanan Listrik Terhadap Konsumsi Spesifik Bahan Bakar Pembangkitan, Heat Rate Dan Efisiensi Pada Unit 8 PLTU PT. Indonesian Tsingshan Stainless Steel. *Jurnal LOGITECH Logika Technology*, 7(1). <https://doi.org/10.64109/logitech.v7i1.2>
- Ariyandi, A., Taqiyuddin, T., & S, D. P. (2024). Analisis Variasi Pembebanan Terhadap Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Pembangkit Batubara, Heat Rate dan Biaya Produksi Listrik di PLTU Asam Asam Unit 4. *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, 9(1), 526–532. <https://doi.org/10.36277/jteuniba.v9i1.298>
- Fauzie, M. S., Afifudin, A., Sugriwa, F. S., & Artiyasa, M. (2024). *Technical Challenges of the Energy Transition PLTU Palabuhan Ratu Pgu to a Clean Energy Source* (pp. 18–22). [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-406-8\\_5](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-406-8_5)
- Febrianto, M. R., Widiawaty, C. D., & Wijayanti, F. (2025). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Nilai Turbin Heat Rate dan Efisiensi Termal Turbin pada PLTU Cilacap. *Jurnal Mekanik Terapan*, 6(3), 117–124. <https://doi.org/10.32722/jmt.v6i3.7610>
- Fidi, F., Dwi, F., Desy, A., Muhammad, O. R. A., & Trio, A. C. (2025). Evaluasi Implementasi Audit Energi dan Sistem Manajemen Energi ISO 50001:2018 di PT Putra Perkasa Abadi Site Borneo Indobara. *GEMILANG: Jurnal Manajemen Dan Akuntansi*, 5(2), 325–334. <https://doi.org/10.56910/gemilang.v5i2.2070>
- Hamzah, N., Yunus, A. M. S., & Dirgantama, D. (2021). Analisis Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Heat Rate pada Unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Jeneponto 2 135 MW. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 18(2), 233–240. <https://doi.org/10.31963/sinergi.v18i2.2674>
- Herlin Sumarna, Ramadhoni, T. S., Septano, G. D., Purfaji, P., & Okviyanto, T. (2026). Pengaruh Beban Operasi terhadap Nilai Net Plant Heat Rate (NPHR) pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *INSOLOGI: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 5(2), 699–707. <https://doi.org/10.55123/insologi.v5i2.7977>
- Hutabarat, P. H., Zambak, M. F., & Suwarno, S. (2022). Prediksi Kebutuhan Energi Listrik Wilayah Pln Kota Parapat Simalungun Sampai Tahun 2024. *Journal Of Electrical And System Control Engineering*, 5(2), 52–58. <https://doi.org/10.31289/jesce.v5i2.5757>
- Indramaulana, G. (2026). Analisis Investment Grade Energy Audit untuk Peningkatan Efisiensi Energi pada Gedung Perkantoran di Jakarta Timur. *Factory Jurnal Industri, Manajemen Dan Rekayasa Sistem Industri*, 4(3), 517–527. <https://doi.org/10.56211/factory.v4i3.1656>
- Jamal, J., Bhuana, C., & Alihar, F. (2020). Analisis Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Jeneponto. *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, 18(1), 20–28. <https://doi.org/10.31963/sinergi.v18i1.2233>
- Kocak, G., & Durmusoglu, Y. (2024). Exergy efficiency and EEXI analysis of a marine power plant at partial load conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 238(3), 543–552. <https://doi.org/10.1177/14750902231207133>
- Mahaputra, K. R. (2021). Analisis Kinerja Turbin Uap Unit 3 Berdasarkan Performance Test Di Unit Pelaksana Pt.Pln (Persero) Pembangkitan Asam-Asam. *JTAM ROTARY*, 3(1), 95. [https://doi.org/10.20527/jtam\\_rotary.v3i1.3460](https://doi.org/10.20527/jtam_rotary.v3i1.3460)
- Matthee, F. J. L., Pascoe, J., van Laar, J. H., & Marais, J. H. (2024). Improving Energy Management in Deep-Level Mines by Integrating Advanced M&V with Operational Changes. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 41(1), 99–109. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00888-x>
- Moioli, E., & Schildhauer, T. (2022). Negative CO<sub>2</sub> emissions from flexible biofuel synthesis: Concepts, potentials, technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112120>
- Pambudi, A., Sukmana, I., & Risano, Y. (2023). Pengaruh Nilai Spesifik Konsumsi Bahan Bakar (SFC) Terhadap Jumlah Pemakaian Batubara Di PT Bukit Energi Servis Terpadu PLTU Peltar 2x8 MW. *Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung*, 4(2), 133–142. <https://doi.org/10.23960/jpi.v4n2.109>
- Pelser, W. A., Marais, J. H., van Laar, J. H., & Mathews, E. H. (2022). Development and Application of an Integrated Approach to Reduce Costs in Steel Production Planning. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 6(3), 819–836. <https://doi.org/10.1007/s41660-022-00237-3>
- Setiawan, F., Melkias, A., & Slameto. (2022). Analisis Kinerja Turbin Uap Unit 1 Di Cirebon Power. *Jurnal Teknik Energi*, 11(2), 7–11. <https://doi.org/10.35313/energi.v11i2.3517>
- Sihombing, G., Lubis, K., & Panggabean, P. (2024). Analisis Performansi Turbin Uap dengan Kapasitas 115 MW dan Putaran 3000 Rpm pada unit 1 PLTU Labuhan Angin Sibolga. *Elektriese: Jurnal Sains Dan Teknologi Elektro*, 14(02), 193–202. <https://doi.org/10.47709/elektriese.v14i02.4803>
- Siregar, A. M., Lusiana, L., Utami, I., & Fakhruddin, M. (2021). Modelling Electric Energy Availability Toward Popupation Growth and Land Conversion in Padang Lawas Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 927(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/927/1/012006>
- Wahyudi, T., & Yuriadi, K. (2023). Analisis Rugi-Rugi Heat Rate Pltu Banten 3 Lontar Akibat Deviasi Parameter Pada Kondisi Aktual Menggunakan Analisis Gap. *Jurnal Konversi Energi Dan Manufaktur*, 8–19. <https://doi.org/10.21009/JKEM.9.1.2>
- Wahyudi, T., & Yuriadi Kusuma. (2023). Analisis Rugi-Rugi Heat Rate Pltu Banten 3 Lontar Akibat Deviasi Parameter Pada Kondisi Aktual Menggunakan Analisis Gap. *Jurnal Konversi Energi Dan Manufaktur*, 8–19. <https://doi.org/10.21009/JKEM.9.1.2>
- Yohanes, A. R., Widayat, & Windarta, J. (2024). Optimization of Mechanical Thermal Energy Audit At Pelabuhan Ratu Unit 2 With Pi Vision. *E3S Web of Conferences*, 519, 02004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451902004>