

Actual Performance Analysis of a Rankine Back Pressure System on a 1600 kW Turbine-Generator Unit at PT Kencana Sawit Indonesia Using Python Programming

Muhammad Bayu Septian¹, Arwizet K^{1*}, Yolli Fernanda¹, Andre Kurniawan¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

*Corresponding author: arwizet@ft.unp.ac.id

Received June 26th 2026; Revised July 9th 2026; Accepted July 15th 2026

Abstract

The Palm oil mills require steam systems that can supply electricity and process heat at the same time. This study analyzes the actual performance of a Rankine back pressure system on a 1600 kW turbine-generator unit at PT Kencana Sawit Indonesia using Python programming. The study used field documentation, equipment nameplate data, turbine-generator logsheet data, and an assumed steam flow scenario of 21.0-26.0 ton/h because the boiler steam flow indicator was reported to show an over-range condition. The analysis was carried out by converting actual operating data into thermodynamic performance parameters, including generator load, steam rate, turbine efficiency estimation, power-only efficiency, and energy utilization tendency. The results show that the unit operated under partial load with an average generator output of 715.19 kW or about 44.70% of the 1600 kW nominal capacity. The average steam rate increased from 32.99 kg/kWh at 21.0 ton/h to 40.85 kg/kWh at 26.0 ton/h. The estimated turbine efficiency decreased from 43.45% to 35.10% as the assumed steam flow increased. The power-only efficiency remained low because the exhaust steam was not discharged as waste heat, but was used as process steam in the back pressure system. Python-based processing provides a transparent and repeatable approach for evaluating field logsheet data.

Keywords: Rankine Back Pressure; Steam Turbine; Steam Rate; Python; Palm Oil Mill

Analisis Kinerja Aktual Sistem *Rankine Back Pressure* pada Unit Turbin-Generator 1600 kW PT Kencana Sawit Indonesia Menggunakan Pemrograman Python

Abstrak

Pabrik kelapa sawit memerlukan sistem uap yang mampu memasok energi listrik dan kebutuhan panas proses secara bersamaan. Penelitian ini menganalisis kinerja aktual sistem *Rankine back pressure* pada unit turbin-generator 1600 kW PT Kencana Sawit Indonesia menggunakan pemrograman Python. Data yang digunakan meliputi dokumentasi lapangan, data nameplate peralatan, *logsheet* operasi turbin-generator, serta skenario *steam flow* 21,0-26,0 ton/jam karena indikator *steam flow* boiler dilaporkan mengalami kondisi *over-range*. Analisis dilakukan dengan mengolah data operasi aktual menjadi parameter kinerja termodinamika, meliputi beban generator, *steam rate*, estimasi efisiensi turbin, efisiensi *power-only*, dan kecenderungan pemanfaatan energi. Hasil pengolahan menunjukkan bahwa unit bekerja pada kondisi beban parsial dengan daya rata-rata generator sebesar 715,19 kW atau sekitar 44,70% dari kapasitas nominal 1600 kW. Nilai *steam rate* rata-rata meningkat dari 32,99 kg/kWh pada skenario 21,0 ton/jam menjadi 40,85 kg/kWh pada skenario 26,0 ton/jam. Estimasi efisiensi turbin menurun dari 43,45% menjadi 35,10% seiring meningkatnya skenario *steam flow*. Efisiensi *power-only* tetap rendah karena uap buang turbin tidak dibuang sebagai rugi panas, melainkan dimanfaatkan sebagai uap proses pada sistem back pressure. Pengolahan berbasis Python memberikan pendekatan yang transparan dan dapat diulang untuk mengevaluasi data *logsheet* lapangan.

Kata kunci: *Rankine Back Pressure*; Turbin Uap; *Steam Rate*; Python; Pabrik Kelapa Sawit

I. PENDAHULUAN

Sistem pembangkit listrik pada pabrik kelapa sawit umumnya tidak hanya berfungsi menghasilkan listrik, tetapi juga menyediakan uap proses untuk sterilizer, digester, klarifikasi, dan unit pengolahan lainnya. Pada pabrik kelapa sawit, sistem kogenerasi umumnya memanfaatkan residu biomassa seperti fiber dan cangkang sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap bertekanan, kemudian uap tersebut diekspansikan pada turbin uap *back pressure* dan uap buangnya dimanfaatkan kembali untuk kebutuhan proses pabrik (Husain et al., 2003). Kondisi ini membuat sistem *Rankine back pressure* lebih sesuai dibandingkan siklus kondensasi penuh, karena uap keluaran turbin masih dimanfaatkan sebagai energi panas proses setelah menghasilkan kerja mekanik pada turbin.

Pemanfaatan biomassa sawit sebagai bahan bakar boiler menjadi salah satu dasar penting dalam sistem energi pabrik kelapa sawit. Limbah biomassa sawit juga berpotensi dikembangkan menjadi bahan bakar padat alternatif karena tandan kosong kelapa sawit dapat diolah menjadi briket dengan kerapatan dan stabilitas bentuk yang baik pada kondisi temperatur dan tekanan pemadatan tertentu (Albasyit et al., 2025). Pemanfaatan limbah organik menjadi briket menunjukkan bahwa biomassa dapat ditingkatkan nilai energinya melalui proses pemanasan dan penekanan sehingga menghasilkan bahan bakar padat yang lebih bernilai guna (Saputra et al., 2024). Cangkang kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat alternatif karena memiliki nilai kalor yang mendukung pemanfaatannya sebagai sumber energi biomassa (Fauzun et al., 2024). Ketersediaan fiber dan cangkang dari proses produksi memungkinkan pembangkitan uap dilakukan secara terintegrasi dengan kebutuhan proses pabrik (Booneimsri et al., 2018). Neraca energi antara bahan bakar, uap, dan daya listrik perlu dievaluasi secara aktual agar potensi biomassa dapat dimanfaatkan secara tepat (Ramachandra et al., 2005).

Secara termodinamika, kinerja sistem turbin uap dipengaruhi oleh tekanan uap masuk, tekanan *exhaust*, temperatur uap, laju aliran uap, serta daya generator yang dihasilkan (Cengel et al., 2019). Prinsip

analisis energi pada siklus rankine digunakan untuk menilai perubahan entalpi, kerja turbin, kalor masuk, dan efisiensi sistem (Moran et al., 2014).

Pengumpulan data operasi di lapangan sering menghadapi kendala karena data belum tersedia dalam bentuk digital yang langsung siap dianalisis.. Data *logsheet* masih dicatat secara manual, sedangkan beberapa instrumen dapat mengalami gangguan pembacaan, seperti *steam flow* meter yang menunjukkan kondisi *over-range*. Kondisi ini menuntut pendekatan pengolahan data yang transparan, sehingga asumsi teknis, sumber data, dan hasil perhitungan dapat dilacak secara jelas (Rada, 2021).

Pemrograman Python dapat digunakan sebagai alat bantu analisis karena mampu mengolah data numerik, menghitung properti termodinamika, dan menghasilkan visualisasi grafik secara terbuka (Joshi et al., 2023). Pendekatan simulasi komputasi juga banyak digunakan untuk mengevaluasi perubahan parameter operasi pada sistem fluida, termasuk tekanan dan kecepatan aliran, karena hasilnya dapat divisualisasikan secara terukur (Sidiq dan Al-Janani, 2025). Penggunaan perangkat komputasi terbuka juga mendukung fleksibilitas pemodelan dan pemeriksaan ulang algoritma dalam penelitian teknik (Milano, 2006). Pengembangan aplikasi properti air-uap berbasis IAPWS atau CoolProp juga menunjukkan bahwa Python dapat mendukung analisis termodinamika secara praktis (Manggala et al., 2025). Selain itu, perangkat komputasi terbuka berbasis Python dapat digunakan dalam pembelajaran dan pemodelan sistem energi (Hofmann et al., 2023).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja aktual sistem *Rankine back pressure* pada unit turbin-generator 1600 kW PT Kencana Sawit Indonesia menggunakan Python. Fokus penelitian diarahkan pada pengolahan data operasi aktual, evaluasi beban generator, perhitungan *steam rate*, estimasi efisiensi turbin, serta interpretasi pengaruh skenario *steam flow* terhadap kinerja sistem.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis data operasi aktual. Objek penelitian adalah sistem turbin-generator uap 1600 kW yang bekerja pada konfigurasi *Rankine back pressure* di PT Kencana Sawit Indonesia. Data utama berasal dari dokumentasi lapangan, nameplate turbin-generator, serta *logsheet* operasi turbin-generator yang memuat tekanan uap masuk, tekanan *exhaust*, daya generator, energi listrik, arus, faktor daya, dan tegangan.

Data boiler digunakan sebagai informasi pendukung untuk memahami kondisi operasi sistem uap. Temperatur feedwater 70 derajat C digunakan berdasarkan pembacaan *logsheet* boiler dan tidak dijadikan variabel utama penelitian. Temperatur *feedwater* tetap perlu dicatat karena pemanasan awal air umpan sebelum masuk boiler berpengaruh terhadap kebutuhan panas boiler dan efisiensi siklus pembangkit uap (Adha et al., 2026). Karena *steam flow* aktual pada indikator boiler dilaporkan mengalami kondisi *over-range*, analisis laju aliran uap dilakukan melalui tiga skenario, yaitu 21,0 ton/jam, 23,5 ton/jam, dan 26,0 ton/jam.

Tahapan analisis dimulai dari transkripsi data *logsheet*, pembersihan data, konversi satuan, perhitungan parameter termodinamika, dan visualisasi hasil. Pendekatan komputasi seperti ini memungkinkan proses perhitungan diulang dengan parameter yang sama maupun parameter yang diperbarui (Hofmann et al., 2023).

Parameter utama yang dihitung meliputi beban generator, persentase beban terhadap kapasitas nominal, *steam rate*, estimasi efisiensi turbin, dan efisiensi *power-only*. Efisiensi turbin estimasi dihitung dari perbandingan kerja spesifik aktual terhadap kerja spesifik ideal, sedangkan efisiensi *power-only* digunakan untuk menunjukkan proporsi energi uap yang berubah menjadi listrik tanpa memasukkan manfaat panas proses.

Tabel 1. Ringkasan data operasi aktual turbin-generator

Parameter	Satuan	Minimum	Rata-Rata	Maksimum
Tekanan uap masuk	barG	12.00	19.40	25.00
Tekanan <i>exhaust</i>	barG	1.80	2.96	3.50
Daya generator	kW	200.00	715.19	915.00
Faktor daya	-	0.90	0.91	0.92
Tegangan	V	400.00	422.00	440.00

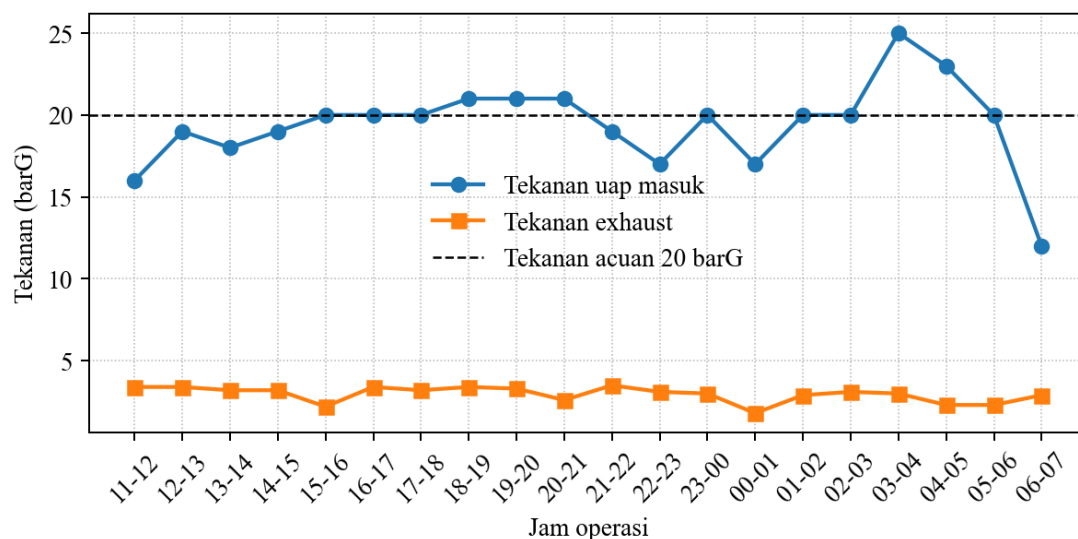
III. HASIL PENELITIAN

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa unit turbin-generator 1600 kW beroperasi pada beban parsial. Daya generator aktual berada pada rentang 200-915 kW dengan nilai rata-rata 715,19 kW. Nilai ini menunjukkan bahwa unit belum bekerja mendekati kapasitas nominalnya, sehingga evaluasi kinerja tidak dapat hanya mengacu pada kapasitas nameplate, tetapi harus menggunakan data operasi aktual.

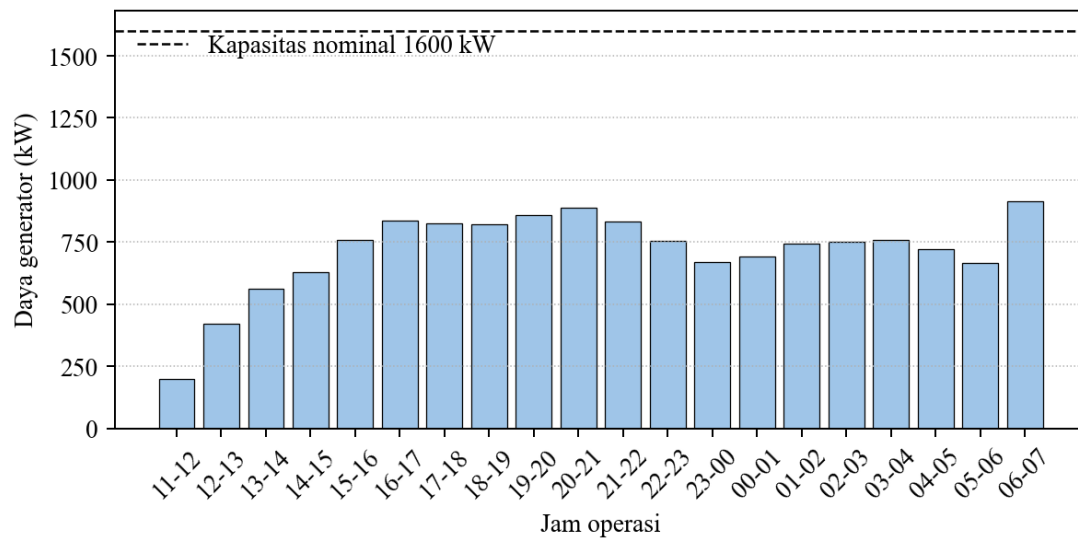
Tabel 2. Ringkasan hasil analisis berdasarkan skenario *steam flow*

<i>Steam flow</i> (ton/jam)	Daya Rata-Rata (kW)	<i>Steam rate</i> (kg/kWh)	Efisiensi Turbin (%)	Efisiensi <i>Power-only</i> (%)
21.0	715.19	32.99	43.45	5.12
23.5	715.19	36.92	38.83	4.57
26.0	715.19	40.85	35.10	4.13

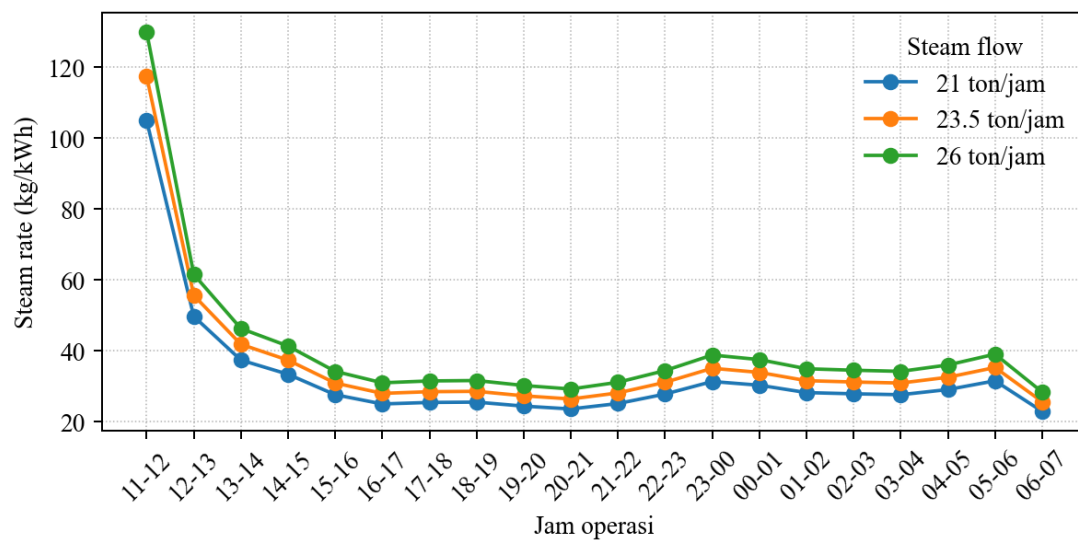
Visualisasi hasil analisis digunakan untuk memperjelas hubungan antara kondisi operasi aktual dan kinerja sistem turbin-generator. Grafik yang ditampilkan meliputi tekanan uap masuk dan tekanan *exhaust*, beban generator aktual, *steam rate* berdasarkan skenario *steam flow*, serta efisiensi sistem pada setiap skenario. Keempat grafik tersebut disajikan secara terpisah agar perubahan masing-masing parameter dapat dibaca dengan lebih jelas.



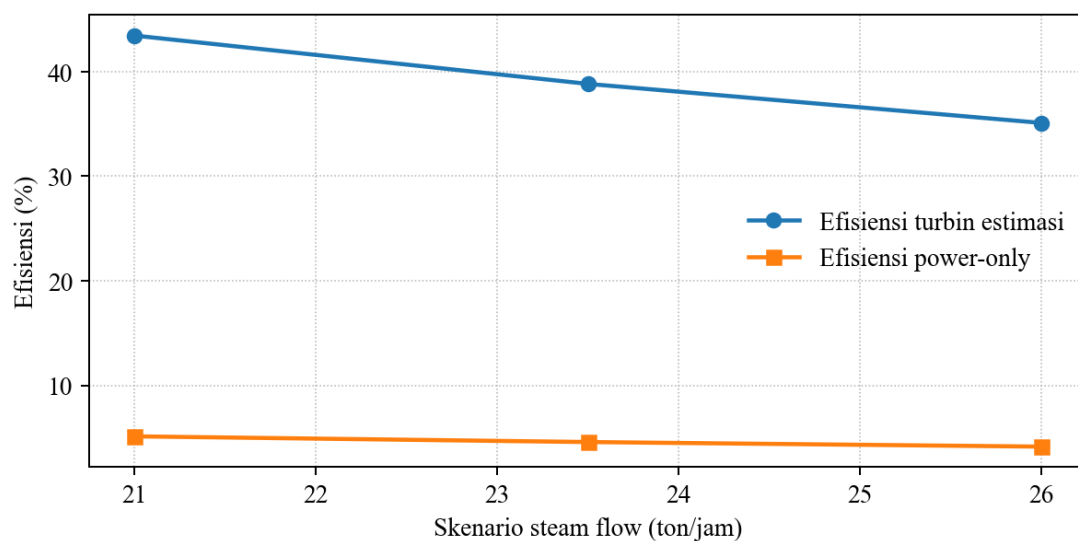
Gambar 1. Grafik tekanan uap masuk dan tekanan *exhaust*



Gambar 2. Grafik beban generator aktual



Gambar 3. Grafik *steam rate* berdasarkan skenario *steam flow*



Gambar 4. Grafik efisiensi berdasarkan skenario *steam flow*

Berdasarkan Gambar 1, tekanan uap masuk mengalami fluktuasi selama periode operasi, sedangkan tekanan *exhaust* berada pada rentang yang lebih rendah sesuai karakteristik sistem back pressure. Gambar 2 menunjukkan bahwa unit turbin-generator bekerja pada kondisi beban parsial karena daya yang dihasilkan masih berada di bawah kapasitas nominal 1600 kW. Selanjutnya, Gambar 3 memperlihatkan bahwa peningkatan skenario *steam flow* menyebabkan nilai *steam rate* meningkat karena laju aliran uap yang diasumsikan lebih besar tidak diikuti kenaikan daya generator yang sebanding. Gambar 4 menunjukkan bahwa efisiensi turbin estimasi cenderung menurun ketika skenario *steam flow* meningkat, sedangkan efisiensi *power-only* tetap rendah karena sebagian energi uap masih dimanfaatkan sebagai uap proses pada sistem back pressure.

IV. PEMBAHASAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi operasi aktual berbeda dari kondisi nominal peralatan. Evaluasi kinerja turbin uap perlu mempertimbangkan kondisi operasi aktual, pembebanan, serta optimasi termal karena faktor-faktor tersebut berpengaruh terhadap keberlanjutan dan efisiensi pembangkitan energi (Avevor et al., 2025). Perubahan tekanan uap masuk, temperatur uap, tekanan buang, dan beban operasi dapat memengaruhi konsumsi uap serta efisiensi turbin, sehingga evaluasi berdasarkan kondisi aktual diperlukan untuk menilai performa turbin secara lebih representatif (Rout, 2013). Beban rata-rata generator sebesar 715,19 kW menunjukkan bahwa evaluasi kinerja sistem harus mempertimbangkan kondisi beban parsial. Pada sistem turbin uap, perubahan tekanan masuk, tekanan *exhaust*, dan laju aliran uap akan memengaruhi penurunan entalpi yang tersedia untuk menghasilkan kerja turbin (Cengel et al., 2019). Interpretasi tersebut sejalan dengan prinsip analisis energi pada sistem termodinamika terbuka (Moran et al., 2014).

Peningkatan skenario *steam flow* dari 21,0 ton/jam menjadi 26,0 ton/jam menaikkan *steam rate* rata-rata dari 32,99 kg/kWh menjadi 40,85 kg/kWh. Secara praktis, kondisi ini berarti jumlah uap yang dikaitkan dengan setiap satuan energi listrik menjadi lebih besar. Pada sistem operasi aktual, kenaikan *steam flow* tidak selalu diikuti kenaikan daya generator secara proporsional karena beban listrik pabrik, pengaturan governor, dan kebutuhan uap proses juga ikut menentukan kondisi kerja turbin.

Efisiensi *power-only* yang rendah tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai kegagalan sistem, karena sistem yang dianalisis merupakan *Rankine back pressure*. Pada konfigurasi ini, uap *exhaust* masih membawa energi termal yang sengaja dimanfaatkan untuk kebutuhan proses pabrik (Sinuraya et al., 2023). Oleh sebab itu, evaluasi sistem back pressure perlu dibedakan dari sistem kondensasi yang mengejar keluaran listrik maksimum (Booneimsri et al., 2018).

Kondisi *steam flow* meter yang mengalami *over-range* menjadi batasan penting dalam interpretasi hasil. Skenario 21,0-26,0 ton/jam dipakai untuk menjaga analisis tetap berada pada rentang operasi yang diinformasikan operator, tetapi bukan pengganti pengukuran flow meter yang terkalibrasi. Pencatatan data yang lebih baik akan meningkatkan keandalan estimasi konsumsi energi dan evaluasi efisiensi peralatan (Rada, 2021).

Dibandingkan aplikasi komersial tertutup, penggunaan Python memberikan keunggulan pada keterbukaan algoritma, kemudahan pengulangan perhitungan, dan fleksibilitas dalam menyesuaikan parameter lapangan (Allen et al., 2023). Keunggulan ini penting untuk penelitian berbasis *logsheet* karena setiap angka input, persamaan, dan keluaran grafik dapat diperiksa kembali. Kelebihan Python sebagai media pemodelan termodinamika dan pendidikan teknik juga sejalan dengan pengembangan perangkat analisis terbuka (Hofmann et al., 2023). Pemodelan siklus daya uap menggunakan Python mendukung analisis yang lebih mudah direplikasi oleh peneliti atau mahasiswa (Joshi et al., 2023).

Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan data operasi aktual pabrik kelapa sawit untuk menganalisis sistem *Rankine back pressure* 1600 kW dengan pemrograman Python. Penelitian terdahulu banyak berfokus pada perhitungan efisiensi boiler menggunakan pendekatan tertentu (Celen & Erdem, 2017). Kajian lain membahas efisiensi boiler berbahan bakar biomassa sawit atau performa boiler biomassa skala kecil (Pohan, 2024). Penelitian ini menggabungkan *logsheet* lapangan, kondisi

instrumen aktual, skenario *steam flow*, dan visualisasi kinerja sehingga lebih dekat dengan kebutuhan evaluasi operasional di pabrik kelapa sawit.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, sistem *Rankine back pressure* pada unit turbin-generator 1600 kW PT Kencana Sawit Indonesia bekerja pada kondisi beban parsial dengan daya rata-rata 715,19 kW. Skenario *steam flow* menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran uap dari 21,0 ton/jam menjadi 26,0 ton/jam meningkatkan *steam rate* dan menurunkan estimasi efisiensi turbin. Efisiensi *power-only* yang rendah perlu dibaca sesuai karakteristik sistem back pressure karena uap *exhaust* masih dimanfaatkan sebagai uap proses. Program Python yang dikembangkan mampu mengolah data *logsheet* aktual, menghitung parameter kinerja, dan menyajikan visualisasi yang mendukung evaluasi operasi sistem secara lebih transparan.

VI. REFERENSI

- Adha, Z., Kurniawan, A., Arwizet, K., & Fernanda, Y. (2026). Calculation of High Pressure Heater Efficiency in the Feedwater System of PT PLN IP Teluk Sirih Unit 2 Steam Power Plant Perhitungan Efisiensi High Pressure Heater pada Sistem Feedwater Pembangkit Listrik Tenaga Uap PT PLN IP Teluk Sirih Unit 2. *Jurnal Vokasi Mekanika*, 8(1), 13–25. <https://doi.org/10.24036/v1frxb70>.
- Albasyit, M. R., Fernanda, Y., Refdinal, & Kurniawan, A. (2025). Characterization of Density and Stability of Oil Palm Empty Fruit Bunch Briquettes without Binder under Variations of Molding Temperature and Compaction Pressure. *Jurnal Vokasi Mekanika*, 7(4), 497–507. <https://doi.org/10.24036/vomek.v7i4.902>.
- Allen, R., Svortevik, E., & Bergersen, H. (2023). A Python-based code for modeling the thermodynamics of the vapor compression cycle applied to residential heat pumps. *Proceedings of the 64th International Conference of Scandinavian Simulation Society, SIMS 2023 Vasteras, Sweden, September 25-28, 2023*, 200, 167–174. <https://doi.org/10.3384/ecp200022>
- Avevor, J., Agbale Aikins, S., & Anebi Enyejo, L. (2025). Optimizing Gas and Steam Turbine Performance Through Predictive Maintenance and Thermal Optimization for Sustainable and Cost-Effective Power Generation. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 10(3), 994–1010. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/25mar1336>
- Booneimsri, P., Kubaha, K., & Chullabodhi, C. (2018). Increasing power generation with enhanced cogeneration using waste energy in palm oil mills. *Energy Science and Engineering*, 6(3), 154–173. <https://doi.org/10.1002/ese3.196>
- Celen, P., & Erdem, H. (2017). a Case Study for Calculation of Boiler Efficiency By Using Indirect Method. *3rd CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING ISTANBUL 2017 – ICAME2017 19-21 December 2017*, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey A, (December). <https://www.researchgate.net/publication/331225163>
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoglu, M. (2019). Thermodynamics An Engineering Approach. In *McGraw-Hill Education* (9th ed.).
- Fauzun, H., Nurdin, H., Lapisa, R., & Primandari, S. R. P. (2024). Study of the Calorific Value of Palm Palm Shell Briquettes As a Solid Fuel. *Jurnal Vokasi Mekanika*, 6(3), 297–302. <https://doi.org/10.24036/vomek.v6i3.714>.
- Hofmann, M., Witte, F., Fritz, M., Freibmann, J., Tuschy, I., & Tsatsaronis, G. (2023). Free and Open-

- Source Teaching: Understanding Exergy using Thermal Engineering Systems in Python (TESPy). *36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2023*, 195–209. <https://doi.org/10.52202/069564-0019>
- Husain, Z., Zainal, Z. A., & Abdullah, M. Z. (2003). Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills. *Biomass and Bioenergy*, 24(2), 117–124. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00101-0)
- Joshi, A. R., Deo, A., Parashar, A., Mishra, D. R., & Dumka, P. (2023). Modelling Steam Power Cycle using Python. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 3307, 152–163. <https://doi.org/10.32628/cseit228671>
- Manggala, A., Yerizam, M., & Effendy, S. (2025). Development of a Portable Steam Table Application Integrating IAPWS-IF97 and CoolProp for Thermodynamic Analysis. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 4(3), 215–226. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i3.351>
- Milano, F. (2006). An Open Source Power System Analysis Toolbox. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES*. <https://doi.org/10.1109/pes.2006.1708946>
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2014). Fundamentals of Engineering Thermodynamics. In *John Wiley & Sons, Inc.* (8th ed., Vol. 18, Number 2). <https://doi.org/10.1080/03043799308928176>
- Pohan, A. N. R. (2024). *Analisa Efisiensi pada Water Tube Boiler Type Vicker Hopkins Berbahan Bakar Fiber, Cangkang Sawit dan Empty Fruit Bunch di PT Multimas Nabati Asahan*. Universitas Islam Sumatera Utara.
- Rada, E. (2021). *Turbine Generator Performance Dashboard for Predictive Maintenance Strategies* (Number December). Purdue University.
- Ramachandra, T. V., Krishna, S. V., & Shruthi, B. V. (2005). Decision Support System to Assess Regional Biomass Energy Potential. *International Journal of Green Energy*, 1(4), 407–428. <https://doi.org/10.1081/ge-200038704>
- Rout, I. (2013). Thermal Analysis of Steam Turbine Power Plants. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 7(2), 28–36. <https://doi.org/10.9790/1684-0722836>
- Saputra, R., Fernanda, Y., Refdinal, R., & Primandari, S. R. P. (2024). the Production of Organic Waste Bricket Using the Hydrothermal Method of Airtight Molds Through Toursional Pressure. *Jurnal Vokasi Mekanika*, 6(4), 446–457. <https://doi.org/10.24036/vomek.v6i4.759>
- Sinuraya, R. A., Effendi, Z., & Aisyah, S. (2023). Analisa Kehilangan Panas Secara Konduksi Pada Saluran Steam (Pipa) Dari Turbin Ke Back Pressure Vessel (Bpv) Pada Pabrik Kelapa Sawit (Pks) Kapasitas 45 Ton/Jam. *Jurnal Turbo Program Studi Teknik Mesin UM Metro*, 12(2), 372–384. <https://doi.org/10.47199/jaf.v5i2.198>