

Analisis Kinerja Turbin Uap Sebagai Penggerak Generator Berdasarkan Variasi Kapasitas Olah di Pabrik Kelapa Sawit PT Cisadane Sawit Raya

Peter Prayogo Pangestu¹⁾, Yunaidi^{1,*}, Saptyaji Harnowo¹⁾, Ronaldo Siregar²⁾

¹⁾ Prodi Teknologi Rekayasa Mesin Industri Perkebunan, Politeknik LPP Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

²⁾ Prodi Teknologi Mesin, Politeknik LPP Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

*) Corresponding author: yunaidi@polteklpp.ac.id

Abstrak

Pabrik kelapa sawit membutuhkan pasokan energi listrik dan uap proses yang stabil agar seluruh stasiun pengolahan dapat beroperasi secara berkesinambungan. Salah satu sistem yang umum digunakan ialah turbin uap tipe *back-pressure* yang menggerakkan generator sekaligus menyediakan uap buang untuk kebutuhan proses. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja turbin uap sebagai penggerak generator pada variasi kapasitas olah di Pabrik Kelapa Sawit PT Cisadane Sawit Raya. Penelitian dilakukan melalui observasi lapangan, wawancara operator, dan pengumpulan data log sheet selama Maret-Juni 2023, kemudian dilanjutkan dengan pengolahan data pada Juni-September 2023. Parameter yang dianalisis meliputi kapasitas olah, tekanan dan temperatur uap masuk, tekanan uap keluar, laju aliran uap, daya generator, efisiensi isentropik, *theoretical steam rate*, dan *specific steam consumption*. Data numerik dianalisis kembali secara deskriptif dan menggunakan regresi linier sederhana. Turbin Shinko tipe *single-stage* berkapasitas nominal 1.600 kW beroperasi pada tekanan masuk sekitar 30 bar, temperatur 233 °C, tekanan keluar 2,8-3,2 bar, dan laju uap 20.000 kg/jam. Pada kapasitas olah 45,26-60,23 ton/jam, efisiensi turbin berada pada rentang 37,01-39,29% dengan rata-rata 38,39%. Hubungan linier kapasitas olah terhadap efisiensi tergolong lemah dengan R^2 sebesar 0,157, sedangkan kapasitas olah terhadap *specific steam consumption* menunjukkan kecenderungan meningkat dengan R^2 sebesar 0,439. Daya generator yang dilaporkan meningkat dari sekitar 963,3 kW menjadi 1.161 kW. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas olah lebih jelas berkaitan dengan peningkatan kebutuhan daya dan konsumsi uap dibandingkan dengan peningkatan efisiensi turbin.

Kata kunci: daya generator; efisiensi isentropik; kapasitas olah; pabrik kelapa sawit; turbin uap

Abstract

Palm oil mills require a stable supply of electricity and process steam to maintain continuous operation across all processing stations. A back-pressure steam turbine is commonly used to drive an electric generator while supplying exhaust steam for process heating. This study evaluated the performance of a steam turbine generator under different processing-capacity conditions at PT Cisadane Sawit Raya Palm Oil Mill. Field observations, operator interviews, and daily log-sheet data were collected from March to June 2023, followed by data processing from June to September 2023. The evaluated parameters included processing capacity, inlet steam pressure and temperature, exhaust pressure, steam mass flow rate, generator power, isentropic efficiency, theoretical steam rate, and specific steam consumption. The numerical data were reanalyzed using descriptive statistics and simple linear regression. The 1,600 kW Shinko single-stage turbine operated at an inlet pressure of approximately 30 bar, an inlet temperature of 233 °C, an exhaust pressure of 2.8-3.2 bar, and a steam flow rate of 20,000 kg/h. At processing capacities of 45.26-60.23 t/h, turbine efficiency ranged from 37.01% to 39.29%, with an average of 38.39%. The linear relationship between processing capacity and efficiency was weak, with an R^2 of 0.157, while processing capacity and specific steam consumption showed an increasing tendency with an R^2 of 0.439. The reported generator output increased from approximately 963.3 kW to 1,161 kW. These findings indicate that increasing processing capacity was more clearly associated with higher power demand and steam consumption than with improved turbine efficiency.

Keywords: generator power; isentropic efficiency; palm oil mill; processing capacity; steam turbine

PENDAHULUAN

Industri pengolahan kelapa sawit membutuhkan energi listrik dalam jumlah besar untuk mengoperasikan stasiun penerimaan, perebusan, penebahan, pengepresan, pemurnian, pengolahan inti, dan utilitas. Karena kebutuhan energi berlangsung bersamaan dengan kebutuhan uap proses, pabrik kelapa sawit umumnya mengembangkan sistem pembangkitan mandiri yang memanfaatkan serat dan cangkang sebagai bahan bakar boiler. Pemanfaatan residu kelapa sawit melalui sistem bioenergi dapat mendukung penyediaan listrik dan uap proses sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap pasokan energi eksternal (Kaniapan et al., 2021; Salleh et al., 2020; Zamri et al., 2022)

Pada sistem tersebut, turbin uap berfungsi mengubah energi termal dan energi tekanan uap menjadi energi mekanik pada poros, kemudian generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Uap keluar dari turbin *back-pressure* tidak langsung dibuang, tetapi ditampung pada *back pressure vessel* untuk digunakan kembali pada proses pengolahan. Konfigurasi kogenerasi ini sesuai dengan kebutuhan pabrik kelapa sawit yang memerlukan listrik dan uap secara simultan serta menghadapi perubahan permintaan energi akibat variasi kapasitas pengolahan (Medica-Viola et al., 2020; Panjapornpon et al., 2024).

Kinerja turbin dipengaruhi oleh kondisi uap masuk, tekanan buang, laju aliran massa, kondisi sudu dan nozel, kebocoran, gesekan, serta kestabilan beban. Secara termodinamika, kinerja dapat dievaluasi melalui penurunan entalpi aktual terhadap penurunan entalpi isentropik. Pendekatan keseimbangan energi dan panas juga digunakan untuk mengidentifikasi kerugian serta perubahan kinerja turbin pada kondisi operasi yang berbeda (Medica-Viola et al., 2020; Petrovic et al., 2025).

Kajian terkini menggunakan pengujian, pemodelan termodinamika, dan data operasi untuk mengevaluasi daya serta kinerja turbin. Namun, analisis yang mengaitkan kapasitas olah pabrik dengan efisiensi, daya generator, dan konsumsi uap pada operasi aktual masih terbatas. Data lapangan diperlukan untuk membedakan kenaikan daya akibat beban dari peningkatan efisiensi konversi energi (Bělohoubek et al., 2024; Pasandideh et al., 2024; Petrovic et al., 2025).

Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja turbin uap sebagai penggerak generator pada variasi kapasitas olah di Pabrik Kelapa Sawit PT Cisadane Sawit Raya. Evaluasi dilakukan terhadap kondisi operasi, efisiensi isentropik, *theoretical steam rate*, *specific steam consumption*, serta kecenderungan hubungan kapasitas olah dengan parameter kinerja tersebut.

METODE

Penelitian dilaksanakan di Pabrik Kelapa Sawit PT Cisadane Sawit Raya, Kabupaten Labuhanbatu, Sumatera Utara. Objek penelitian ialah unit turbin uap-generator pada stasiun pembangkit tenaga. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif berbasis data operasi aktual.

Peralatan dan kondisi operasi

Turbin yang diamati merupakan turbin uap *Shinko model* RB5M tipe *single-stage* yang terhubung dengan generator. Pengamatan dan pengambilan data dilakukan selama kegiatan magang pada Maret-Juni 2023, sedangkan pengolahan dan analisis data dilakukan pada Juni-September 2023. Turbin menerima uap dari boiler *water-tube* dan menyalurkan uap buang ke *back pressure vessel*. Peralatan pendukung pengamatan meliputi *pressure gauge*, panel kontrol generator, *log sheet* operator, dan *steam table*. Spesifikasi utama turbin disajikan pada Tabel 1, sedangkan kondisi fisik unit ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1. Spesifikasi utama turbin uap

No.	Parameter	Spesifikasi
1	Merek dan model	Shinko RB5M
2	Tipe	<i>Single-stage, back-pressure</i>
3	Daya nominal	1.600 kW
4	Tekanan uap desain	30 barG
5	Temperatur uap desain	236 °C
6	Tekanan buang desain	3,1 barG
7	Putaran turbin / poros keluaran	5.208 rpm / 1.500 rpm
8	Tahun pembuatan	2022



Gambar 1. Unit turbin uap dan generator di PT Cisadane Sawit Raya

Pengumpulan dan pengolahan data

Data primer diperoleh melalui observasi langsung dan wawancara dengan operator, mandor, serta personel maintenance. Data sekunder diperoleh dari *log sheet* harian yang memuat waktu operasi, kapasitas olah, tekanan dan temperatur uap masuk, tekanan uap keluar, putaran generator, serta daya listrik. Pengamatan kinerja pada tabel hasil mencakup sepuluh kondisi operasi dengan kapasitas olah 45,26-60,23 ton/jam. Laju aliran uap yang digunakan dalam perhitungan sebesar 20.000 kg/jam atau sekitar 5,56 kg/s.

Nilai entalpi dan entropi ditentukan menggunakan steam table berdasarkan tekanan dan temperatur uap. Efisiensi turbin dihitung dengan membandingkan penurunan entalpi aktual terhadap penurunan entalpi isentropik, sesuai dengan pendekatan analisis energi turbin uap yang digunakan dalam penelitian terdahulu (Medica-Viola et al., 2020). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\dot{m} = m / t \dots\dots\dots(1)$$

$$\dot{W}_t = \dot{m} (h_1 - h_2) \dots\dots\dots(2)$$

$$\eta_t = [(h_1 - h_2) / (h_1 - h_{2s})] \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

$$TSR = 3.600 / (h_1 - h_{2s}) \dots\dots\dots(4)$$

$$SSC = TSR / \eta_t \dots\dots\dots(5)$$

Pada persamaan tersebut, $\dot{m}$ adalah laju aliran massa uap (kg/s), $\dot{W}_t$ adalah daya turbin (kW), h_1 adalah entalpi uap masuk (kJ/kg), h_2 adalah entalpi uap keluar aktual (kJ/kg), h_{2s} adalah entalpi uap keluar isentropik (kJ/kg), η_t adalah efisiensi isentropik, TSR adalah theoretical steam rate (kg/kWh), dan SSC adalah *specific steam consumption* (kg/kWh). Data dianalisis dengan statistik deskriptif dan regresi linier sederhana; R^2 digunakan untuk menilai proporsi perubahan parameter yang dijelaskan oleh kapasitas olah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik operasi turbin

Sistem pembangkit tidak menggunakan kondensor. Uap buang turbin dialirkan menuju *back pressure vessel*, kemudian didistribusikan ke stasiun yang membutuhkan pemanasan, antara lain stasiun rebusan, pengepresan, dan pemurnian. Pola ini memperlihatkan fungsi ganda turbin sebagai penghasil daya listrik dan pemasok uap proses, sebagaimana karakteristik turbin *back-pressure* pada sistem kogenerasi (Medica-Viola et al., 2020; Panjapornpon et al., 2024). Selama pengamatan, putaran poros generator

dipertahankan sekitar 1.500 rpm. Tekanan uap masuk umumnya berada pada 30 bar dengan temperatur sekitar 233 °C, sedangkan tekanan buang berfluktuasi pada 2,8-3,2 bar.

Laju aliran uap sebesar 20.000 kg/jam setara dengan 5,56 kg/s. Berdasarkan laporan operasi, daya generator berada pada kisaran sekitar 963,3-1.161 kW atau 60-73% dari kapasitas nominal 1.600 kW. Kondisi ini menunjukkan bahwa unit masih mempunyai cadangan kapasitas, tetapi keluaran aktual tetap dipengaruhi oleh beban listrik pabrik, bukaan governor, kualitas uap, dan kerugian mekanis pada turbin serta *gearbox*. Kebocoran, degradasi komponen aliran, ketidakpastian pengukuran, dan kondisi operasi di luar titik desain dapat menurunkan kemampuan turbin mengubah energi uap menjadi kerja poros (Bělohoubek et al., 2024; Petrovic et al., 2025).

Variasi efisiensi dan konsumsi uap

Hasil pengolahan ulang data pada sepuluh kondisi operasi disajikan pada Tabel 2. Efisiensi turbin berada pada rentang 37,01-39,29% dengan rata-rata 38,39%. Nilai tertinggi terjadi pada kapasitas olah 52,12 ton/jam, sedangkan nilai terendah terjadi pada kapasitas 56,98 ton/jam. Rentang yang relatif sempit menunjukkan bahwa perubahan kapasitas olah tidak selalu diikuti perubahan efisiensi dengan arah yang sama. Efisiensi merupakan rasio konversi energi yang dipengaruhi oleh kualitas ekspansi, kerugian internal, dan kondisi operasi parsial, bukan semata-mata oleh besarnya beban (Medica-Viola et al., 2020; Petrovic et al., 2025).

Tabel 2. Hasil evaluasi kinerja berdasarkan variasi kapasitas olah

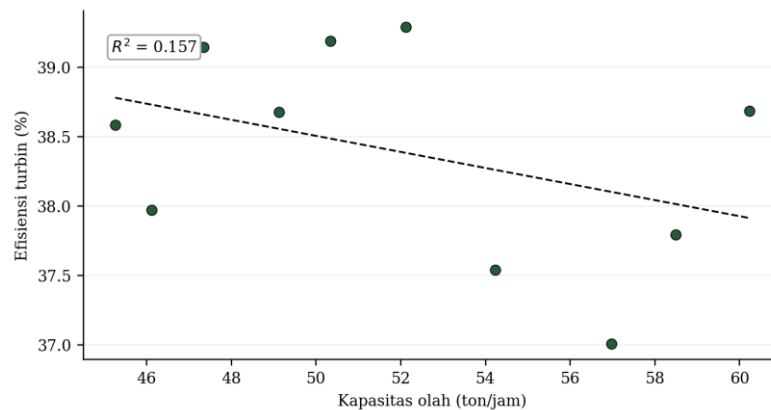
Tanggal	Kapasitas olah (ton/jam)	Efisiensi (%)	SSC (kg/kWh)
8/5/2023	45,26	38,59	27,54
9/5/2023	46,12	37,97	27,01
10/5/2023	47,34	39,15	27,77
11/5/2023	49,12	38,68	27,40
12/5/2023	50,34	39,19	26,40
13/5/2023	52,12	39,29	26,40
15/5/2023	54,23	37,54	28,10
16/5/2023	56,98	37,01	27,40
17/5/2023	58,49	37,80	29,20
19/5/2023	60,23	38,69	30,40
Rata-rata	52,02	38,39	27,76

SSC berada pada rentang 26,40-30,40 kg/kWh dengan rata-rata 27,76 kg/kWh. Nilai SSC yang lebih besar menunjukkan bahwa massa uap yang diperlukan untuk

menghasilkan setiap satuan energi listrik juga lebih besar. Kenaikan SSC pada kapasitas tinggi mengindikasikan bahwa peningkatan beban tidak seluruhnya diikuti peningkatan efektivitas ekspansi. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh kebutuhan uap proses, kestabilan tekanan header, pengaturan governor, karakteristik peralatan penggerak, dan kondisi jaringan uap (Furda et al., 2020; Medica-Viola et al., 2020). Oleh karena itu, pengendalian kapasitas olah perlu diselaraskan dengan kestabilan suplai uap dan beban listrik.

Hubungan kapasitas olah dengan parameter kinerja

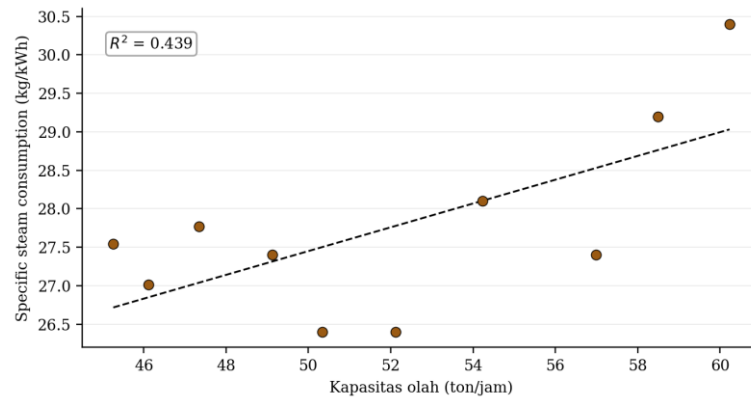
Gambar 2 memperlihatkan hubungan kapasitas olah dengan efisiensi turbin. Regresi linier menghasilkan koefisien determinasi sebesar 0,157, sehingga hanya sekitar 15,7% variasi efisiensi yang dapat dijelaskan oleh perubahan kapasitas olah secara linier. Garis kecenderungan yang sedikit menurun tidak cukup untuk menyatakan bahwa peningkatan kapasitas olah menurunkan efisiensi secara langsung. Hasil ini lebih tepat diinterpretasikan bahwa efisiensi berfluktuasi di sekitar 38% dan dipengaruhi oleh faktor operasi lain yang tidak dicatat secara rinci. Penelitian berbasis data juga menunjukkan bahwa prediksi kinerja turbin memerlukan beberapa parameter operasi yang saling berhubungan, bukan hanya satu variabel beban (Bělohoubek et al., 2024; Lu et al., 2022; Pasandideh et al., 2024).



Gambar 2. Hubungan kapasitas olah dengan efisiensi turbin

Hubungan kapasitas olah dengan SSC pada Gambar 3 menghasilkan R^2 sebesar 0,439. Nilai tersebut menunjukkan kecenderungan hubungan yang lebih kuat dibandingkan hubungan kapasitas olah dengan efisiensi. Pada kapasitas olah yang lebih tinggi, kebutuhan uap per satuan energi listrik cenderung meningkat. Temuan ini sejalan dengan karakteristik sistem *back-pressure*, karena uap yang masuk turbin tidak hanya ditentukan oleh kebutuhan

daya generator, tetapi juga oleh kebutuhan uap proses di bagian hilir (Medica-Viola et al., 2020; Panjapornpon et al., 2024). Dengan demikian, kapasitas olah dapat meningkatkan permintaan uap secara keseluruhan tanpa selalu meningkatkan efisiensi turbin.



Gambar 3. Hubungan kapasitas olah dengan *specific steam consumption*

Daya generator yang dilaporkan meningkat dari sekitar 963,3 kW pada kapasitas olah 45,26 ton/jam menjadi 1.161 kW pada kapasitas 60,23 ton/jam. Kenaikan tersebut logis karena jumlah peralatan yang bekerja dan beban proses meningkat seiring kapasitas olah. Namun, kenaikan daya tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya indikator bahwa turbin menjadi lebih efisien. Turbin dapat menghasilkan daya lebih besar karena menerima aliran uap dan beban yang lebih besar, sementara rasio konversi energinya tetap relatif sama. Oleh karena itu, keluaran daya perlu dianalisis bersama efisiensi, aliran uap, dan kondisi operasi turbin (Medica-Viola et al., 2020; Pasandideh et al., 2024).

Rata-rata efisiensi sekitar 38,39% dapat digunakan sebagai nilai dasar untuk pemantauan kinerja selanjutnya. Evaluasi berkala sebaiknya mencakup kalibrasi instrumen tekanan dan temperatur, verifikasi laju aliran uap, pemeriksaan *governor valve*, kondisi nozel dan sudu, pelumasan, *alignment turbin-generator*, serta pencatatan daya pada interval yang seragam. Pengujian dengan instrumen terkalibrasi dan penggunaan data operasi multivariabel dapat meningkatkan keandalan diagnosis serta penilaian kinerja turbin (B  lohoubek et al., 2024; Lu et al., 2022; Petrovic et al., 2025). Analisis yang lebih komprehensif juga memerlukan data entalpi yang konsisten, daya generator pada setiap titik pengamatan, dan pemisahan aliran uap untuk pembangkitan listrik serta kebutuhan proses.

KESIMPULAN DAN SARAN

Turbin uap *Shinko single-stage* di Pabrik Kelapa Sawit PT Cisadane Sawit Raya beroperasi pada tekanan masuk sekitar 30 bar, temperatur 233 °C, tekanan buang 2,8-3,2 bar, dan laju aliran uap 20.000 kg/jam. Pada kapasitas olah 45,26-60,23 ton/jam, efisiensi isentropik berada pada rentang 37,01-39,29% dengan rata-rata 38,39%. Hubungan linier kapasitas olah dengan efisiensi tergolong lemah ($R^2 = 0,157$), sedangkan hubungan kapasitas olah dengan *specific steam consumption* lebih nyata ($R^2 = 0,439$). Daya generator meningkat seiring kapasitas olah, tetapi peningkatan daya tidak secara otomatis menunjukkan peningkatan efisiensi. Dengan demikian, kapasitas olah lebih berkaitan dengan besarnya kebutuhan daya dan uap daripada dengan perubahan efisiensi turbin.

Pemantauan kinerja disarankan menggunakan pencatatan serentak terhadap kapasitas olah, laju aliran uap, tekanan dan temperatur masuk-keluar, daya generator, serta kebutuhan uap proses. Perawatan berkala pada governor, *nozel*, sudu, *gearbox*, sistem pelumasan, dan instrumen ukur perlu dipertahankan untuk menjaga kestabilan operasi. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan data operasi yang lebih panjang dan pengukuran daya pada setiap kondisi agar pengaruh kapasitas olah terhadap efisiensi dan konsumsi uap dapat dianalisis dengan lebih kuat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada manajemen dan karyawan Pabrik Kelapa Sawit PT Cisadane Sawit Raya yang telah memberikan kesempatan pengamatan dan akses data operasi, serta kepada Program Studi Diploma IV Teknologi Rekayasa Mesin Industri Perkebunan Politeknik LPP Yogyakarta atas dukungan akademik selama pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Bělohoubek, M., Liška, K., Kubín, Z., Polcar, P., Smolík, L., & Polach, P. (2024). An Investigation of Efficiency Issues in a Low-Pressure Steam Turbine Using Neural Modelling. *Sensors*, 24(7), 2056. <https://doi.org/10.3390/s24072056>
- Furda, P., Variny, M., Labovská, Z., & Cibulka, T. (2020). Process Drive Sizing Methodology and Multi-Level Modeling Linking MATLAB® and Aspen Plus® Environment. *Processes*, 8(11), 1495. <https://doi.org/10.3390/pr8111495>

- Kaniapan, S., Hassan, S., Ya, H., Patma Nesan, K., & Azeem, M. (2021). The Utilisation of Palm Oil and Oil Palm Residues and the Related Challenges as a Sustainable Alternative in Biofuel, Bioenergy, and Transportation Sector: A Review. *Sustainability*, 13(6), 3110. <https://doi.org/10.3390/su13063110>
- Lu, Y., Xiang, Y., Chen, B., Zhu, H., Yue, J., Jin, Y., He, P., Zhao, Y., Zhu, Y., Si, J., & Zhou, D. (2022). Steam turbine power prediction based on encode-decoder framework guided by the condenser vacuum degree. *PLOS ONE*, 17(10), e0275998. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275998>
- Medica-Viola, V., Baressi Šegota, S., Mrzljak, V., & Štifanić, D. (2020). Comparison of conventional and heat balance based energy analyses of steam turbine. *Pomorstvo*, 34(1), 74–85. <https://doi.org/10.31217/p.34.1.9>
- Panjapornpon, C., Satjeenphong, T., Bardeeniz, S., & Hussain, M. A. (2024). Enhancing sustainability in palm oil industry: Reinforcement learning for renewable energy management considered climatic variability. *Discover Chemical Engineering*, 4(1), 25. <https://doi.org/10.1007/s43938-024-00066-5>
- Pasandideh, M., Taylor, M., Tito, S. R., Atkins, M., & Apperley, M. (2024). Predicting Steam Turbine Power Generation: A Comparison of Long Short-Term Memory and Willans Line Model. *Energies*, 17(2), 352. <https://doi.org/10.3390/en17020352>
- Petrovic, M. V., Milic, S., Petkovic, D., Madzar, T., & Markovic, N. M. (2025). Improving Steam Turbine Plants Performance Through Advanced Testing and Simulation. *Energies*, 18(7), 1615. <https://doi.org/10.3390/en18071615>
- Salleh, S. F., Mohd Roslan, M. E., Abd Rahman, A., Shamsuddin, A. H., Tuan Abdullah, T. A. R., & Sovacool, B. K. (2020). Transitioning to a sustainable development framework for bioenergy in Malaysia: Policy suggestions to catalyse the utilisation of palm oil mill residues. *Energy, Sustainability and Society*, 10(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s13705-020-00269-y>
- Vedran, M., Jasna, P.-O., Igor, P., & Ivan, G. (n.d.). *Thermodynamic analysis of backpressure and condensing steam turbines from cogeneration system*.
- Zamri, M. F. M. A., Milano, J., Shamsuddin, A. H., Roslan, M. E. M., Salleh, S. F., Rahman, A. A., Bahru, R., Fattah, I. M. R., & Mahlia, T. M. I. (2022). An overview of palm oil biomass for power generation sector decarbonization in Malaysia: Progress, challenges, and prospects. *WIREs Energy and Environment*, 11(4), e437. <https://doi.org/10.1002/wene.437>