Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi
Volume 26, Issue 01, Februari 2026, 142-147
Webite: https://ji.unbari.ac.id, E-Mail: jiubj.unbari@gmail.com
e-ISSN: 2549-4236 (Online), p-ISSN: 1411-8939 (Print), DOI: 10.33087/jiubj.v26i1.6406

Analisis Pengaruh Tekanan Uap Inlet Turbine terhadap Output Daya

Jilal Lasmana*, Dani Rusirawan
Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi National Bandung
*Correspondence: aajillalasmana122@gmail.com

ABSTRAK
Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi tekanan uap masuk terhadap output daya yang dihasilkan turbin uap. Data dianalisis melalui pendekatan termodinamika berdasarkan nilai entalpi inlet–outlet, efisiensi isentropik, serta perhitungan laju aliran massa uap. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan tekanan inlet dari kondisi suboptimal ke kondisi desain dapat meningkatkan entalpi drop hingga 12–18%, yang berdampak pada kenaikan output daya turbin sebesar 8–15%. Tekanan uap yang lebih rendah dari nilai desain menyebabkan penurunan daya yang signifikan akibat berkurangnya potensi ekspansi, naiknya moisture content, dan meningkatnya kerugian termodinamika. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengaturan tekanan uap inlet yang stabil dan sesuai dengan parameter desain merupakan kunci untuk menjaga efisiensi dan performa turbin uap dalam pembangkit modern.

Kata Kunci: Tekanan Uap, Turbin Uap, Siklus Rankine, Daya Turbin, Efisiensi Termal.

ABSTRACT
This study aims to analyze the impact of steam inlet pressure variations on the power output of steam turbines in modern power plant systems. The methodology includes thermodynamic calculations based on operating data, evaluation of inlet–outlet enthalpy using steam tables, and power output estimation considering turbine isentropic efficiency. The results indicate that increasing the inlet pressure toward its design value enhances the enthalpy drop by 12–18% and improves turbine power output by 8–15%. Conversely, a reduction in inlet pressure significantly decreases power output due to reduced expansion potential and increased moisture content in the turbine's final stages. This study highlights the importance of maintaining stable and optimal steam inlet pressure to ensure efficient and reliable operation of modern steam power plants.

Keywords: *Steam Pressure, Steam Turbine, Rankine Cycle, Turbine Power, Thermal Efficiency.*

PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan sistem pembangkitan yang bergantung pada konversi energi panas menjadi energi mekanik melalui turbin uap. Salah satu parameter utama yang menentukan performa turbin adalah tekanan uap pada bagian inlet (Hagita et al., 2025). Tekanan yang lebih tinggi memungkinkan terjadinya ekspansi uap yang lebih besar, sehingga meningkatkan entalpi drop dan output daya turbin. Dalam operasi nyata, tekanan uap inlet dapat mengalami variasi yang disebabkan oleh perubahan beban boiler, kondisi kualitas air–uap, fouling pada boiler, hingga pembatasan operasional (*operational constraint*). Variasi ini berdampak langsung terhadap performa turbin dan efisiensi termal pembangkit (Cao, Li, Liu, et al., 2025).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penurunan tekanan inlet sebesar 5–10 bar dari kondisi desain dapat mengurangi output daya turbin hingga lebih dari 10% (Kong et al., 2025). Oleh karena itu, pemahaman tentang hubungan antara tekanan uap inlet dan output daya sangat penting untuk optimasi operasi pembangkit. Dalam praktik lapangan, variasi tekanan inlet dapat disebabkan oleh berbagai faktor (Miladinović et al., 2025). Variasi beban listrik pada grid menyebabkan variasi produksi uap dari boiler; kualitas dan konsistensi pembakaran bahan bakar dapat memengaruhi tekanan dan temperatur uap; fouling atau scaling pada boiler tubing mengurangi efisiensi perpindahan panas; serta ketidakstabilan sistem kontrol seperti governor valve dan main steam control valve dapat memicu fluktuasi tekanan yang signifikan. Selain itu, kondisi air umpan (*feedwater*) seperti perubahan TDS, suhu kondensat, dan kualitas demineralisasi juga memengaruhi kestabilan tekanan uap (Vescovi et al., 2025).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa tekanan inlet merupakan salah satu parameter operasi yang paling sensitif dalam menentukan efisiensi turbin. Penurunan tekanan inlet sebesar 1–2 bar dapat menurunkan output daya beberapa persen, tergantung pada desain turbin. Namun, sebagian besar penelitian tersebut hanya menggunakan pendekatan simulasi atau studi literatur. Studi berbasis data operasi aktual di fasilitas pembangkit masih terbatas, terutama yang membahas fluktuasi tekanan inlet secara real-time, hubungan statistiknya dengan output daya, serta dampaknya terhadap parameter termodinamika lain seperti efisiensi isentropik, rasio ekspansi, dan konsumsi panas (heat rate) (Wang et al., 2026).

Dengan mempertimbangkan pentingnya stabilitas tekanan inlet terhadap kinerja turbin, penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi menyeluruh mengenai pengaruh fluktuasi tekanan uap inlet terhadap performa turbin uap di pembangkit listrik. Evaluasi dilakukan dengan menganalisis data operasional aktual dari sistem Distributed Control System (DCS) dan Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA),

yang mencakup tekanan inlet, suhu inlet, laju aliran massa uap, serta output daya turbin pada berbagai kondisi beban. Selain itu, analisis termodinamika dan statistik digunakan untuk mengidentifikasi korelasi antara tekanan inlet dan output daya serta mengukur sensitivitas perubahan tekanan terhadap efisiensi turbin.

METODE

Metode analisis dalam penelitian ini dirancang untuk mengkaji secara kuantitatif pengaruh tekanan uap inlet turbin terhadap output daya yang dihasilkan. Analisis dilakukan dengan mengintegrasikan pendekatan statistik dan termodinamika sehingga hubungan antarvariabel tidak hanya ditunjukkan secara matematis, tetapi juga dapat dijelaskan berdasarkan prinsip fisika sistem turbin uap. Tahap awal analisis diawali dengan validasi dan penyaringan data operasional. Data tekanan uap inlet dan output daya yang diperoleh dari sistem Distributed Control System (DCS) diseleksi untuk memastikan bahwa data berada pada kondisi operasi normal dan steady-state. Data yang menunjukkan adanya gangguan operasi, fluktuasi beban ekstrem, atau kondisi transien dikeluarkan dari dataset analisis. Selanjutnya, data yang telah tervalidasi dinormalisasi untuk menjaga konsistensi satuan dan memudahkan proses analisis lanjutan.

Analisis statistik digunakan untuk mengidentifikasi hubungan dan tingkat pengaruh tekanan uap inlet terhadap output daya turbin. Analisis korelasi dilakukan untuk mengetahui arah dan kekuatan hubungan antarvariabel, sedangkan analisis regresi digunakan untuk membangun model hubungan fungsional antara tekanan uap inlet dan output daya. Model regresi linier yang digunakan dinyatakan sebagai:

$$P_{out} = a + b \cdot P_{in}$$

P_{out}merupakan output daya turbin (MW), P_{in}adalah tekanan uap inlet turbin (MPa), serta $a$dan $b$adalah konstanta regresi. Nilai koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk mengevaluasi kontribusi tekanan uap inlet dalam menjelaskan variasi output daya. Uji signifikansi dilakukan untuk memastikan bahwa hubungan yang diperoleh bersifat statistik signifikan.

Untuk memperkuat interpretasi hasil statistik, dilakukan analisis termodinamika berdasarkan prinsip Hukum I Termodinamika dan konsep siklus Rankine. Daya turbin dihitung dari selisih energi spesifik uap masuk dan keluar turbin dengan persamaan:

$$P_t = \dot{m} \cdot (h_{in} - h_{out})$$

$\dot{m}$a dalah laju aliran massa uap (kg/s), h_{in}merupakan entalpi uap masuk turbin (kJ/kg), dan h_{out}adalah entalpi uap keluar turbin (kJ/kg). Nilai entalpi ditentukan berdasarkan data tekanan dan temperatur uap dengan mengacu pada tabel uap atau perangkat lunak termodinamika yang relevan

Hasil perhitungan daya turbin secara termodinamika kemudian dibandingkan dengan data output daya aktual pembangkit. Perbandingan ini bertujuan untuk memverifikasi konsistensi antara pendekatan teoritis dan kondisi operasi nyata. Selanjutnya, analisis tren dilakukan untuk mengamati pola perubahan output daya akibat variasi tekanan uap inlet pada rentang operasi tertentu.

Tahap akhir, dilakukan evaluasi sensitivitas untuk menilai besarnya perubahan output daya akibat perubahan tekanan uap inlet. Evaluasi ini memberikan gambaran mengenai sensitivitas kinerja turbin terhadap fluktuasi tekanan inlet serta implikasinya terhadap stabilitas dan efisiensi operasi pembangkit. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam pembahasan dan penarikan kesimpulan penelitian.

HASIL

Tabel 1
Data Tekanan Uap Inlet dan Output Daya Turbin

No	Tekanan Uap Inlet (MPa)	Temperatur Inlet (°C)	Laju Aliran Uap (kg/s)	Output Daya (MW)
1	12,5	535	410	96,2
2	12,2	534	408	94,8
3	11,9	533	406	93,1
4	11,6	531	404	91,5
5	11,3	530	401	89,9
6	11,0	528	399	88,2

Sumber: data olahan

Data menunjukkan bahwa penurunan tekanan uap inlet diikuti dengan penurunan output daya turbin. Hal ini mengindikasikan adanya hubungan searah antara tekanan inlet dan daya keluaran. Berdasarkan data pada Tabel 1, dilakukan analisis regresi linier untuk mengetahui pengaruh tekanan uap inlet terhadap output daya. Model regresi diperoleh sebagai berikut:

$$P_{out} = 7{,}84 \cdot P_{in} - 1{,}62$$

dengan: P_{out}= output daya (MW) dan P_{in}= tekanan uap inlet (MPa)

Tabel 2
Hasil Analisis Statistik Regresi

Parameter Statistik	Nilai
Koefisien korelasi (r)	0,987
Koefisien determinasi (R^2)	0,974
Nilai signifikansi (p)	< 0,05

Sumber: data olahan

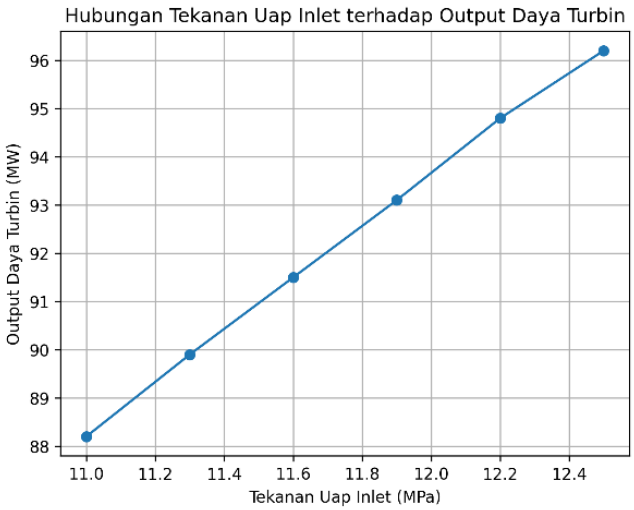
Nilai koefisien korelasi sebesar 0,987 menunjukkan hubungan yang **sangat kuat** antara tekanan uap inlet dan output daya. Nilai R^2 sebesar 0,974 mengindikasikan bahwa 97,4% variasi output daya dapat dijelaskan oleh perubahan tekanan uap inlet, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor operasional lain.

Tabel 3
Hasil Perhitungan Termodinamika Turbin

Tekanan Inlet (MPa)	Entalpi Inlet (kJ/kg)	Entalpi Outlet (kJ/kg)	Δh (kJ/kg)	Daya Teoretis (MW)
12,5	3445	2920	525	95,8
12,2	3438	2922	516	94,1
11,9	3430	2924	506	92,6
11,6	3422	2927	495	90,9
11,3	3415	2930	485	89,2

Sumber: data olahan

Terlihat bahwa penurunan tekanan inlet menyebabkan penurunan entalpi uap masuk, sehingga selisih entalpi (Δh) menurun. Hal ini berdampak langsung pada penurunan daya turbin sesuai dengan prinsip Hukum I Termodinamika.



Sumber: data olahan

Gambar 1
Grafik Hubungan Tekanan Uap Inlet dan Output Daya Turbin

Grafik menunjukkan adanya hubungan linier positif antara tekanan uap inlet pada sumbu-x dan output daya turbin pada sumbu-y. Pola ini mengindikasikan bahwa setiap peningkatan tekanan uap inlet diikuti oleh kenaikan output daya turbin secara konsisten. Garis tren hasil regresi yang terbentuk memiliki kemiringan positif, yang menegaskan bahwa tekanan uap inlet merupakan variabel yang berperan dominan dalam menentukan besarnya daya yang dihasilkan turbin uap (Zhang et al., 2025).

Secara termodinamika, peningkatan tekanan uap inlet akan meningkatkan energi spesifik uap yang masuk ke dalam turbin, sehingga selisih entalpi antara uap masuk dan uap keluar menjadi lebih besar. Kondisi tersebut memungkinkan terjadinya proses ekspansi uap yang lebih optimal di dalam sudu-sudu turbin, sehingga energi panas dapat dikonversi menjadi kerja mekanik dalam jumlah yang lebih besar (Wen et al., 2026). Hal ini selaras dengan prinsip kerja siklus Rankine, di mana performa turbin sangat dipengaruhi oleh kondisi uap pada sisi inlet (Tang et al., 2025).

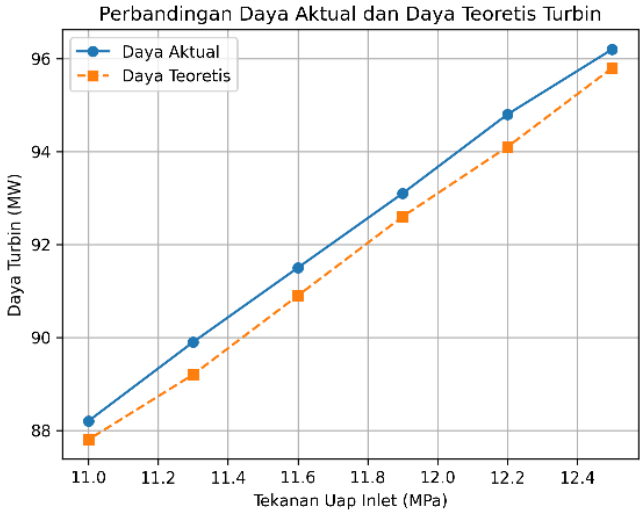
Selain itu, kerapatan titik data yang berada dekat dengan garis regresi menunjukkan bahwa hubungan antara tekanan uap inlet dan output daya bersifat stabil dan memiliki tingkat penyimpangan yang relatif kecil. Penyimpangan yang terjadi dapat disebabkan oleh faktor

operasional lain, seperti variasi laju aliran massa uap, perubahan efisiensi isentropik turbin, serta adanya rugi-rugi mekanik dan termal selama proses konversi energi (Jiang et al., 2025).

Kemiringan garis regresi yang positif menegaskan bahwa tekanan uap inlet merupakan parameter yang sangat berpengaruh dalam menentukan besarnya output daya turbin uap. Semakin besar nilai tekanan uap inlet, maka kecenderungan daya yang dihasilkan turbin juga semakin meningkat (Mahdavi et al., 2026). Hal ini menunjukkan bahwa perubahan tekanan inlet memberikan respons yang langsung dan signifikan terhadap kinerja turbin, dibandingkan dengan parameter operasi lainnya yang relatif lebih konstan pada kondisi steady-state (Long et al., 2026).

Kondisi tersebut sejalan dengan teori siklus Rankine, di mana peningkatan tekanan dan temperatur uap pada sisi inlet turbin akan meningkatkan energi spesifik uap sebelum mengalami proses ekspansi. Energi spesifik yang lebih tinggi menyebabkan selisih entalpi antara uap masuk dan keluar turbin menjadi lebih besar, sehingga kerja yang dihasilkan selama proses ekspansi juga meningkat (Gu et al., 2026). Dengan demikian, turbin mampu mengonversi energi panas menjadi energi mekanik secara lebih efektif, yang pada akhirnya meningkatkan output daya pembangkit.

Selain itu, kemiringan garis regresi yang konsisten dan stabil menunjukkan bahwa hubungan antara tekanan uap inlet dan daya turbin bersifat linier dalam rentang operasi yang dianalisis. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem turbin masih beroperasi mendekati kondisi desain dan belum mengalami degradasi kinerja yang signifikan (Porto-Hernandez et al., 2023). Apabila tekanan uap inlet tidak terjaga atau mengalami penurunan secara terus-menerus, maka energi yang tersedia untuk proses ekspansi akan berkurang dan efisiensi turbin cenderung menurun. Oleh karena itu, hasil ini menegaskan pentingnya pengendalian tekanan dan temperatur uap inlet sebagai upaya untuk menjaga performa turbin dan kestabilan output daya pada pembangkit listrik tenaga uap (KAKARAS, 2004).



Sumber: data olahan

Gambar 2
Perbandingan Output Daya Aktual dan Daya Hasil Perhitungan Termodinamika

Grafik memperlihatkan bahwa daya hasil perhitungan termodinamika memiliki pola perubahan yang sejalan dengan daya aktual yang dihasilkan oleh pembangkit pada berbagai kondisi tekanan uap inlet. Kecenderungan yang sama antara kedua kurva menunjukkan bahwa model perhitungan termodinamika yang digunakan telah mampu merepresentasikan karakteristik kinerja turbin uap secara umum (Cao, Li, & Li, 2025). Selisih nilai antara daya teoretis dan daya aktual relatif kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa pendekatan perhitungan berdasarkan selisih entalpi uap masuk dan keluar turbin cukup akurat untuk menggambarkan kondisi operasi nyata (Constantinidis et al., 2026).

Perbedaan antara daya hasil perhitungan dan daya aktual terutama disebabkan oleh adanya rugi-rugi yang tidak sepenuhnya diperhitungkan dalam analisis teoretis. Rugi-rugi tersebut meliputi rugi mekanik pada poros dan bantalan turbin, kerugian akibat gesekan fluida di dalam sudu-sudu turbin, serta kehilangan energi akibat kebocoran uap (Ma et al., 2025). Selain itu, efisiensi isentropik turbin yang tidak ideal juga berkontribusi terhadap penurunan daya aktual dibandingkan dengan daya teoretis. Faktor lain seperti kondisi keausan peralatan, ketidaksempurnaan sistem pelumasan, serta fluktuasi kecil pada laju aliran massa uap turut memengaruhi besarnya selisih yang terjadi (Achomo et al., 2026).

Meskipun terdapat perbedaan, kesesuaian tren antara daya aktual dan daya hasil perhitungan menunjukkan bahwa perubahan tekanan uap inlet memberikan pengaruh yang konsisten terhadap kinerja

turbin, baik secara teoritis maupun operasional (Amiri Nezhad et al., 2025). Hal ini mengindikasikan bahwa analisis termodinamika dapat digunakan sebagai alat evaluasi yang andal dalam memantau kinerja turbin uap, sekaligus sebagai dasar untuk mengidentifikasi potensi penurunan efisiensi akibat peningkatan rugi-rugi selama operasi pembangkit.

SIMPULAN

Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa tekanan uap inlet berpengaruh signifikan dan positif terhadap daya keluaran turbin, di mana peningkatan tekanan inlet meningkatkan output daya, sedangkan penurunan tekanan menyebabkan penurunan kinerja turbin. Hubungan tersebut dibuktikan melalui analisis regresi dengan tingkat korelasi dan koefisien determinasi yang sangat tinggi, sehingga variasi daya turbin sebagian besar ditentukan oleh perubahan tekanan uap inlet. Temuan ini diperkuat oleh analisis termodinamika yang menunjukkan bahwa tekanan inlet yang lebih tinggi meningkatkan selisih entalpi uap masuk dan keluar turbin, sehingga kerja turbin dan daya yang dihasilkan menjadi lebih besar. Dengan demikian, tujuan penelitian tercapai dengan menunjukkan bahwa pengendalian tekanan uap inlet sesuai kondisi desain merupakan faktor kunci dalam menjaga stabilitas output daya dan efisiensi operasi turbin uap..

DAFTAR PUSTAKA

Achomo, M. A., Muthukumar, P., Peela, N. R., 2026. Experimental Study And Performance Optimization Of Hydrogen Production In A Structured Millichannel Reactor Via Methanol Steam Reforming. *International Journal Of Hydrogen Energy*, *203*, 153198.

Amiri Nezhad, A., Khoshbakhti Saray, R., Tavakkol Aghaei, A., Shafiei Ghazani, A., 2025. Exergoeconomic Analysis And Optimization Of A Solar-Assisted Integrated Combined Cycle With Direct Steam Generation And Organic Rankine Cycle. *Energy Reports*, *14*, 4779–4796.

Cao, L., Li, J., Liu, X., Si, H., 2025. Numerical Analysis On Spontaneous Condensation Characterization In 3d Twisted Blade Cascade Of An Ultra-Supercritical Steam Turbine. *International Communications In Heat And Mass Transfer*, *168*, 109492.

Cao, L., Li, W., Li, J., 2025. Impact Of The Expansion Rate In The Bend–Twist Wet Steam Stage Of The Steam Turbine On Non-Equilibrium Condensation Characteristics. *Thermal Science And Engineering Progress*, *68*, 104337.

Constantinidis, A., González-Almenara, R., Glos, S., Sánchez, D., 2026. Parallel Review Of Windage Losses In Axial Turbines Running On Steam And Supercritical Carbon Dioxide At Low Load: Causes, Drivers And Effects. *Applied Thermal Engineering*, *287*, 129466.

Gu, J., Zhang, Z., Liu, X., Chang, B., Zhao, T., 2026. Application Of Data-Driven Machine Learning In Performance Prediction And Multi-Objective Optimization Of Green Sustainable Steam-Cured Concrete. *Sustainable Chemistry And Pharmacy*, *50*, 102336.

Hagita, Y., Miyazawa, H., Furusawa, T., Yamamoto, S., 2025. High-Fidelity Large Eddy Simulation Of Transonic Wet Steam Flows Through A Steam Turbine Cascade. *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, *252*, 127415.

Jiang, Z., Du, X., Sun, W., Zhong, Z., Wei, Y., Pan, L., 2025. Effect Of Superheat On Non-Equilibrium Condensation In Nuclear Steam Turbines. *Applied Thermal Engineering*, *281*, 128559.

Kakaras, E., 2004. Compressor Intake-Air Cooling In Gas Turbine Plants. *Energy*, *29*(12–15), 2347–2358.

Kong, D., Li, X., Bi, R., Liu, C., Niu, X., Isaev, S. A., Terekhov, V. I., Penyazkov, O. G., 2025. Influence Of Mist Droplet Injection And Blowing Ratio On Mist/Steam Showerhead Film Cooling On A First-Stage Vane Of Hydrogen Gas Turbine. *Applied Thermal Engineering*, *280*, 128373.

Long, J., Zhao, B., Deng, K., Huang, C., Fan, C., 2026. Minlp-Based Integrated Modeling And Multi-Period Optimization Of Mass-Energy Coupled Fcc-Steam Systems With Carbon-Cost-Oriented Economic Objective. *Computers & Chemical Engineering*, *206*, 109503.

Ma, Y., Du, H., Zheng, S., Zhou, Z., Zhang, H., Ma, Y., Passerini, S., Wu, Y., 2025. High-Entropy Approach Vs. Traditional Doping Strategy For Layered Oxide Cathodes In Alkali-Metal-Ion Batteries: A Comparative Study. *Energy Storage Materials*, *79*, 104295.

Mahdavi, F., Amooey, A. A., Omidbakhshamiri, E., 2026. Multi-Objective Optimization Of Green Hydrogen Production Via Steam Reforming. *International Journal Of Hydrogen Energy*, *206*, 153401.

Miladinović, A., Stajić – Trošić, J., Kijevčanin, M., Stijepović, V., Alnouri, S. Y., Stijepović, M., 2025. Performance Estimation Of A Steam-Turbine Driven Multistage Compressor System. *Case Studies In Thermal Engineering*, *74*, 106764.

Porto-Hernandez, L. A., Vargas, J. V. C., Munoz, M. N., Galeano-Cabral, J., Ordonez, J. C., Balmant, W., Mariano, A. B., 2023. Fundamental Optimization Of Steam Rankine Cycle Power Plants. *Energy Conversion And Management*, *289*, 117148.

Tang, Z., Xu, M., Li, J., Cao, S., Zhang, W., 2025. Enhancing Rotor Temperature Field Prediction For Steam Turbines Using Ec-Ssc-Dnn: A Structural-Symmetry-Constrained Deep Learning Framework. *Energy*, *340*, 139155.

Vescovi, G., Alpy, N., Haubensack, D., Azzaro-Pantel, C., Stouffs, P., 2025. Optimizing The Flexibility Of The Steam Rankine Cycle Of An Smr For Load Following And Cogeneration By Combining A Double Partial Arc Admission For The Turbine. *Energy*, *339*, 139068.

Wang, H., Yao, X., Jiang, Q., 2026. Data Reconciliation Method For Nuclear Power Steam Turbine Unit Based On Combined Robust Function And Generalized Regression Neural Network. *Nuclear Engineering And Design*, *446*, 114578.

Wen, S., Ding, Y., Li, P., Yuan, Q., 2026. Intelligent Thermal-Structural Stress Prediction And Cold Start-Up Optimization Of A Solar Steam Turbine Rotor. *Applied Thermal Engineering*, *286*, 129362.

Zhang, J., Yue, X., Sheng, Y., Chen, Z., Huang, J., Liu, L. 2025. Electro-Thermal-Flow Coupled Analysis Of Thermal Ageing Patterns In Steam Turbine Generator Insulation Under Deep Peak Shaving Conditions. *Smart Power & Energy Security*