

PEMODELAN KINERJA PLTU PAITON 1 DENGAN VARIASI TEKANAN, TEMPERATUR MAIN STEAM DAN TEKANAN KONDENSOR MENGGUNAKAN GATECYCLE

Okto Rosario Nisen Loasana^{1*}, Sudjito², dan Lilis Yuliati³

^{1,2,3}Universitas Brawijaya, Indonesia

*korespondensi: roriloasana07@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton 1 dengan menggunakan variasi tekanan/temperatur uap utama (main steam) dan tekanan kondensor. Dengan menggunakan perangkat lunak GateCycle, penelitian ini mengkaji pengaruh perubahan parameter-parameter tersebut terhadap efisiensi termal, heat rate, dan massa alir bahan bakar pada PLTU. PLTU berbahan bakar batu bara dipilih karena dominasi penggunaannya di Indonesia dan potensi emisi gas rumah kaca yang dihasilkannya. Mengingat pentingnya efisiensi termal dalam mengurangi emisi dan biaya operasional, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan dalam meningkatkan kinerja PLTU. Analisis dilakukan berdasarkan data operasi aktual dari PLTU Paiton 1 dengan kondisi operasi tunak (steady state), serta simulasi dengan GateCycle untuk memprediksi kinerja pembangkit di bawah variasi parameter yang ditentukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan tekanan dan temperatur uap utama serta tekanan kondensor secara signifikan mempengaruhi kinerja PLTU. Peningkatan efisiensi termal dan penurunan heat rate dapat dicapai melalui optimasi parameter-parameter tersebut, yang pada gilirannya dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi CO₂. Penelitian ini memberikan dasar bagi strategi penghematan bahan bakar dan peningkatan efisiensi operasional di PLTU.

Kata kunci: *PLTU, Efisiensi termal, GateCycle, main steam, Tekanan Kondensor, Heat Rate, Emisi CO₂.*

PERFORMANCE MODELING OF PLTU PAITON 1 WITH VARIATIONS IN MAIN STEAM PRESSURE, TEMPERATURE AND CONDENSER PRESSURE USING GATECYCLE

Okto Rosario Nisen Loasana^{1*}, Sudjito², and Lilis Yuliati³

^{1,2,3}Universitas Brawijaya, Indonesia

*correspondence: roriloasana07@gmail.com

Abstract

This study aims to model the performance of the Paiton 1 Steam Power Plant (PLTU) using variations in main steam pressure/temperature and condenser pressure. Using GateCycle software, this research examines the impact of these parameter changes on the thermal efficiency, heat rate, and fuel mass flow of the power plant. Coal-fired steam power plants are chosen due to their dominant usage in Indonesia and their potential greenhouse gas emissions. Given the importance of thermal efficiency in reducing emissions and operational costs, this study aims to provide insights into improving PLTU performance. The analysis is based on actual operational data from the Paiton 1 power plant under steady-state conditions, along with simulations using GateCycle to predict the plant's performance under specified parameter variations. The results show that changes in main steam pressure and temperature, as well as condenser pressure, significantly affect the performance of the power plant. Increased thermal

efficiency and decreased heat rate can be achieved through the optimization of these parameters, which in turn can reduce fuel consumption and CO₂ emissions. This research provides a basis for fuel-saving strategies and operational efficiency improvements in steam power plants.

Keywords: Steam power plant, Thermal Efficiency, GateCycle, Main Steam, Condenser Pressure, Heat Rate, CO₂ emissions.

Pendahuluan

Di Asia Tenggara konsumsi energi tertinggi terdapat di Indonesia. Pada Periode 2017-2050 pertumbuhan Produk Domestik Bruto diproyeksikan meningkat secara signifikan mencapai 6,04 % per tahun, sehingga mendorong peningkatan kebutuhan energi di Indonesia. Kebutuhan listrik dalam lingkup rumah tangga dan komersial dalam beberapa dekade ini terus meningkat dibandingkan tahun sebelumnya (Energy Outlook, 2023).

Kebutuhan manusia terhadap energi listrik yang semakin meningkat memerlukan pembangkit listrik yang cukup. Salah satu jenis pembangkit listrik yang terdapat di Indonesia adalah sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batu bara. Di Indonesia, PLTU merupakan salah satu pembangkit listrik yang banyak dikembangkan karena mempunyai cadangan batu bara yang cukup banyak. Pada tahun 2021, penggunaan batu bara masih mendominasi sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik (Energi Outlook, 2023).

Pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara, dapat memberi efek pada gas rumah kaca sehingga dapat menimbulkan pemanasan global. Pada pertemuan *Conference of the Parties* (COP) ke-16 di Cancun pada tahun 2010, secara resmi disepakati bahwa kenaikan temperatur yang mengakibatkan terjadinya pemanasan global harus dibatasi hingga suhu 2⁰ C. Kemudian Perjanjian Paris pada tahun 2015 yang bertujuan untuk menjaga kenaikan suhu global jauh di bawah 2⁰ C dan mengandung ambisi untuk mengupayakan membatasi kenaikan suhu lebih jauh hingga 1,5⁰ C. (Yue et al., 2020). Maka dari itu perlu untuk mengurangi emisi gas CO₂ yang mengakibatkan efek rumah kaca dan pemanasan global. Salah satu cara untuk mengurangi emisi CO₂ adalah dengan meningkatkan efisiensi PLTU. Gas CO₂ adalah hasil dari pembakaran bahan bakar karbon, salah satunya batu bara dan termasuk dalam kategori gas yang memiliki kemampuan untuk merusak lapisan atmosfer. Seiring berjalannya waktu, lapisan atmosfer dapat terkikis, meningkatkan prosentase hujan asam di sekitarnya. Sejak tahun 1950, hujan asam menjadi fenomena alam yang semakin parah. Tingkat pH hujan asam adalah di bawah 7, atau sekitar 5,6 dari kandungan CO₂ yang larut dalam air hujan dengan bentuk asam lemah. Selain mengurangi emisi, peningkatan efisiensi PLTU juga dapat menghemat biaya operasional.

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merubah energi dari bahan bakar fosil (batubara) menjadi tenaga untuk menggerakkan poros, yang kemudian menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik. Pembangkit listrik ini fluida kerjanya menggunakan air dan uap. Pembangkit listrik berkapasitas tinggi yang bekerja pada tekanan dan suhu tinggi, dapat menghasilkan nilai efisiensi yang lebih tinggi dan mengurangi polusi. Jika dibandingkan dengan pembangkit dengan kapasitas lebih kecil, pembangkit dengan kapasitas lebih besar cenderung menghasilkan tingkat panas yang lebih rendah yang terbuang ke lingkungan (Teguh et al., 2022).

Keadaan lingkungan dapat menjadi faktor eksternal yang mempengaruhi kinerja PLTU. Lokasi geografis menentukan kondisi reservoir dan tingkat humiditas. Peningkatan suhu air laut diduga akan menaikkan beban pendingin pada kondensor. Sehingga jika temperatur air pendingin yang bersirkulasi cukup rendah, dapat menciptakan tekanan balik yang rendah untuk pembuangan turbin. Kinerja kondensor memengaruhi kinerja pembangkit secara keseluruhan dalam hal keluaran daya dan efisiensi termal. Secara umum, kinerja kondensor lebih baik ketika tekanan kondensor lebih rendah. Selain itu, ketika pembangkit listrik mengalami perubahan

beban karena alasan operasional, kinerja kondensor juga dapat terpengaruh (Akpan & Fuls, 2019).

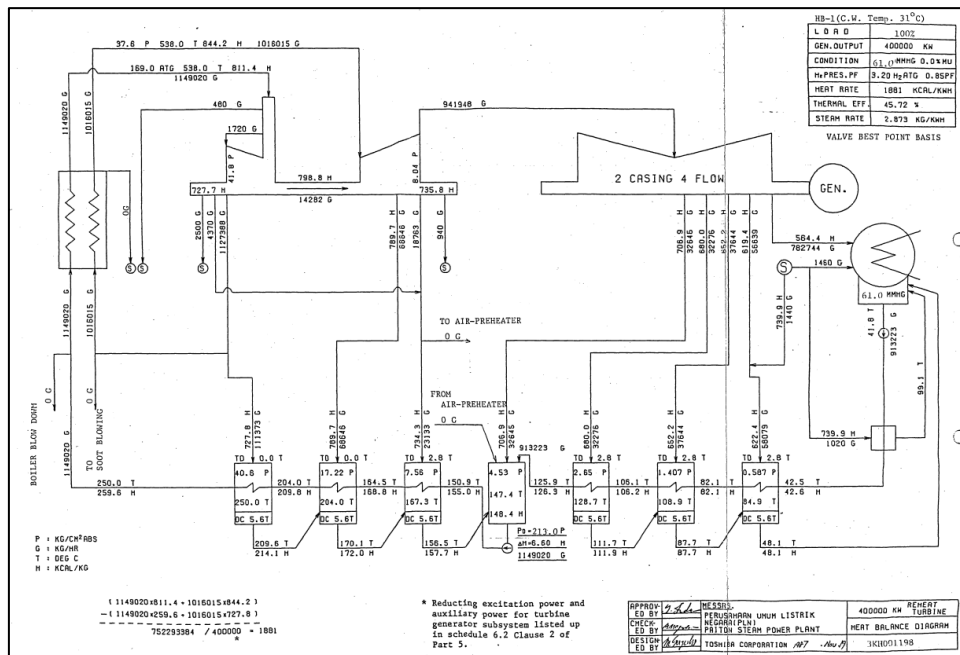
Dalam analisis siklus termodinamika dan pembangkit listrik, efisiensi termal dan output daya adalah hal yang penting. Efisiensi termal sendiri merupakan rasio kerja bersih terhadap panas ditambahkan ke siklus atau pembangkit listrik. Untuk mendapatkan efisiensi PLTU hal yang diperhatikan yaitu : tekanan dan suhu *main steam*, tekanan kondensor, penggunaan *feed water heater*, penggunaan *reheater*, nilai AFR serta perbandingan udara primer dan sekunder. Efisiensi merupakan perbandingan *energy output* dengan *energy input*. Dan *heat rate* merupakan besarnya nilai kalor yang diperlukan untuk menghasilkan listrik sebesar 1 kWh.

Dalam menangani masalah ini, PLN sering melakukan pemadaman listrik bergilir. Namun solusi ini dipandang kurang efisien dikarenakan dapat merugikan konsumen terutama dalam industry rumah tangga dan hunian. Dalam hal ini, untuk merubah nilai parameter operasional pada kondisi aktual akan sangat mengganggu proses pembangkitan energi listrik pada PLTU. Hal ini bisa dapat diselesaikan dengan menggunakan simulasi.

Untuk meningkatkan kinerja suatu pembangkit, hanya ada cara *trial and error* dengan mengacu pada standar operasi yang ada di lapangan sebelum munculnya tren model dan simulasi. Metode *trial and error* tidak hanya memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas, tetapi juga memiliki risiko faktor keamanan yang dipertaruhkan. Selain itu, upaya tersebut dapat mengganggu proses produksi (Chaudhuri, 2006). Dalam hal ini adalah pembangkit energi Listrik. Peneliti sebelumnya menggunakan perangkat lunak Gatecycle untuk simulasi PLTU. Penelitian ini dilakukan untuk memodelkan pengaruh tekanan-temperatur *main steam* dan tekanan kondensor terhadap kinerja PLTU menggunakan *Gatecycle*. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh tekanan dan temperatur *main steam* serta tekanan kondensor terhadap kinerja PLTU Paiton 1 yang meliputi efisiensi, *heat rate*, serta massa alir bahan bakar pada berbagai nilai pembebanan daya listrik.

Metode

Penelitian ini mensimulasikan pembangkit dengan kapasitas energi pembangkitan sebesar 400 MW dari pembakaran batu bara. Konfigurasi dan parameter dibuat sesuai dengan kondisi PLTU Paiton 1.

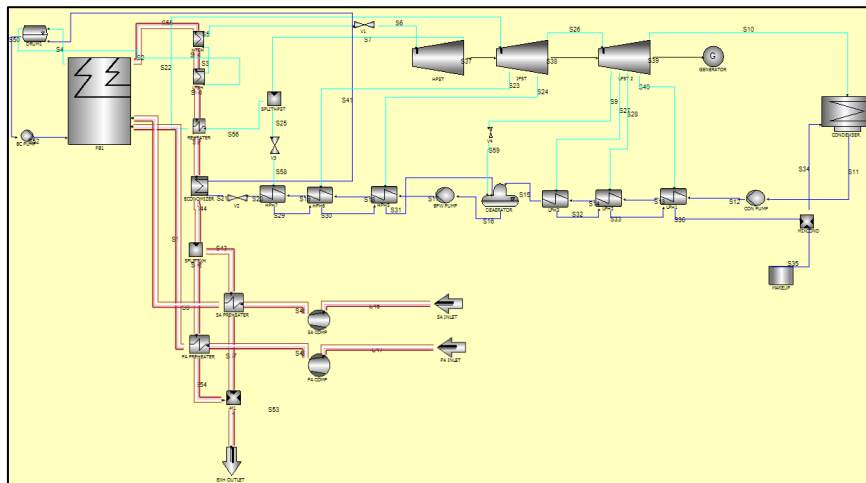


Gambar 1. Heat Balance PLTU Paiton Unit 1

Perangkat lunak yang digunakan

Karakteristik komponen, mulai dari sisi teknis hingga optimisasi secara ekonomi, dibuat dengan model matematika. Perangkat lunak perusahaan general electric digunakan untuk melakukan representasi pembangkit, baik secara *on-design* maupun *off-design*. Pada mode *on-design* parameter yang dimasukan digunakan untuk menghitung dan menentukan ukuran baik secara heat transfer area,efektifitas perpindahan panas. Selain tidak mengubah "ukuran" komponen pembangkit, proses analisis *off-design* dilakukan dengan menggunakan referensi dari *on-design*.

Model pembangkit listrik yang digunakan



Gambar 2. Model pembangkit listrik menggunakan *gatecycle*

Komponen dari boiler tidak berdiri sendiri terdiri dari *economizer*, *evaporator*, *reheater* dan *superheater* yang menghasilkan tekanan dan temperatur main steam. Variasi parameter yang digunakan menggunakan tekanan dan temperatur main steam serta tekanan kondensor. Analisis data yang diperoleh dari simulasi dilakukan untuk mengetahui bagaimana perubahan parameter berdampak pada efisiensi termal dan daya output.

Kalkulasi secara termodinamika

Proses operasional di PLTU Paiton 1 diasumsikan terjadi pada *steady state*. Kalkulasi dari kesetimbangan massa sebagai berikut :

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} \tag{1}$$

Dimana m_{in} dan m_{out} adalah debit aliran masuk dan debit aliran keluar dari sistem, untuk kalkulasi kesetimbangan energi yang juga ditunjukkan pada Persamaan 2 berikut :

$$\sum_i E_i + Q = \sum_o E_o + w \tag{2}$$

Dimana subscript i dan o menunjukan inlet dan outlet. W dan Q merupakan kerja yang dilakukan dan panas yang masuk ke sistem sedangkan E_i dan E_o merupakan energi yang masuk dan energi yang keluar dari sistem. Perhitungan energi pada persamaan 3 merujuk pada nilai efisiensi thermal :

$$\eta = \frac{wt-wp}{Q_{in}} = \frac{(h1-h2)-(h4-h3)}{h1-h4} \times 100 \% \tag{3}$$

Dimana :

η = Efisiensi siklus

$h1$ = Entalpi masuk turbin (kj/kg)

$h2$ = Entalpi keluar turbin (kj/kg)

$h3$ = Entalpi keluar kondensor (kj/kg)

$h4$ = Entalpi masuk boiler (kj/kg).

Hasil dan Pembahasan

Dengan menggunakan model pembangkit listrik tenaga uap yang konvergen dari proses perhitungan pada perangkat lunak Gatecycle pada kondisi *on-design* dengan variasi tekanan, temperatur main steam dan tekanan kondensor yang berbeda. Data awal yang didapatkan dilampirkan pada tabel 1. Tetapannya adalah 2% error untuk perbedaan antara hasil pembangkit dan simulasi selama proses analisis. Heat rate, efisiensi, dan daya yang dihasilkan adalah parameter yang dipilih untuk dibandingkan.

Tabel 1 data awal

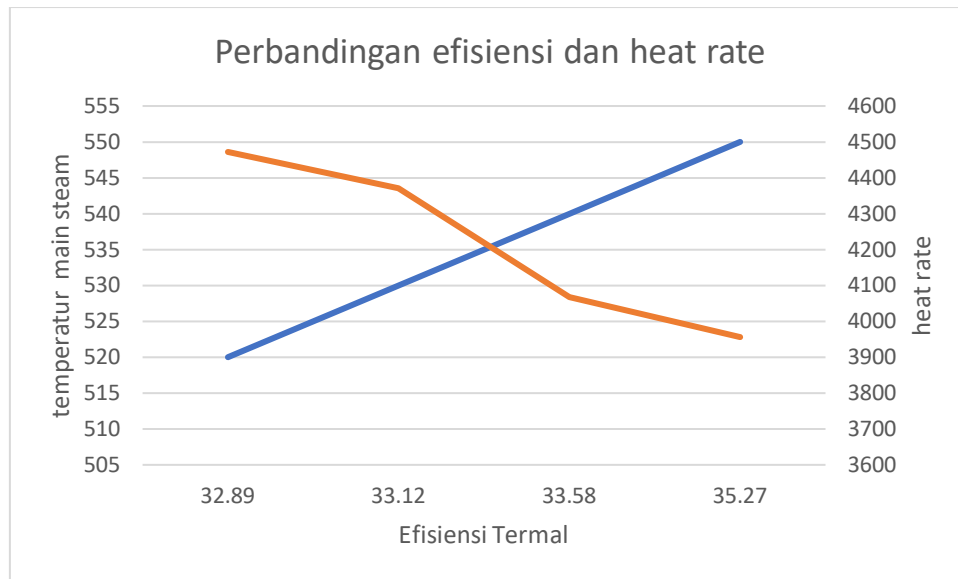
	6-Jan-21	24-Feb-21	10-Mar-21	14-Apr-21	5-May-21	9-Jun-21	7-Jul-21	4-Aug-21	8-Sep-21	6-Oct-21	3-Nov-21	8-Dec-21	19-Jan-22	6-Jan-21
MAIN STEAM PRESSURE	kg/cm ²	168,38	168,76	168,76	168,42	168,84	168,92	168,52	168,02	168,7	168,44	168,4	168,38	167,92
SUPERHEATER OUTLET TEMP	°C	546,12	540,16	541,84	536,48	543,76	540,22	540,5	540,54	539,02	540,38	534,8	538,9	539,18
CONDENSER PRESSURE	mmHg	51,38	48,54	47,64	50,54	53,32		53,12	63,24					

Tabel 2 Hasil simulasi

Tekanan Main Steam (MPa)	Temperatur Main Steam (C)	Tekanan kondensor (kPa)	Efisiensi Termal (%)	Heat Rate (kcal/kwh)
16.0	520	6.0	32.89	4472
16.2	530	6.5	33.12	4371
16.4	540	7.0	33.58	4067
16.6	550	7.5	35.27	3956

Heat rate

Secara umum *heat rate* pembangkit biasanya menunjukkan jumlah energi input yang diperlukan untuk menghasilkan energi generator. *Heat rate* merupakan jumlah energi (kilojoule) yang dibutuhkan untuk menghasilkan satuan unit kerja (megawatt). Semakin besar nilai *heat rate* maka efisiensi pembangkit menurun. Pada proses perancangan pembangkit listrik, ada parameter tambahan yang sangat penting untuk menentukan efisiensi pembangkit listrik. Hasil detail efisiensi dan *heat rate* dapat dilihat pada gambar 3. *Heat rate* sendiri merupakan parameter tambahan yang menunjukkan nilai ekonomis bahan bakar.



Gambar 3. Gambar Perbandingan antara Efisiensi dan heat rate

Efisiensi mengalami perubahan dari 32.89% hingga 35.27% sedangkan heat rate mengalami variasi dari 4472 kcal/kwh hingga 3956 kcal/kwh. Efisiensi tertinggi didapatkan pada nilai heat rate terendah. Peningkatan yang signifikan dalam efisiensi termal dapat berpengaruh dengan peningkatan tekanan dan temperatur boiler, menghasilkan lebih banyak kerja dengan meningkatkan entalpi uap (panas yang ditambahkan) yang masuk ke turbin. Tekanan kondensor yang lebih rendah meningkatkan efisiensi termal. Pada beban listrik yang lebih rendah, tekanan kondensor lebih mudah dijaga pada tingkat yang optimal karena jumlah uap yang harus dikondensasikan lebih sedikit.

Kesimpulan

Secara keseluruhan, peningkatan temperatur main steam cenderung meningkatkan efisiensi termal dari PLTU. Ini karena siklus Rankine dapat mengekstraksi lebih banyak energi dari uap sebelum dibuang sebagai panas, sehingga meningkatkan penggunaan energi secara keseluruhan.

Efisiensi dari pembangkit listrik tenaga uap meningkat yang diikuti dengan penurunan nilai dari heat rate. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan peningkatan antara daya yang dihasilkan serta peningkatan konsumsi bahan bakar pada beban paling rendah menuju beban yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Akpan, P. U., & Fuls, W. F. (2019). Application and limits of a constant effectiveness model for predicting the pressure of steam condensers at off-design loads and cooling fluid temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113779>
- Arslan, O., & Kilic, D. (2021). Concurrent optimization and 4E analysis of organic Rankine cycle power plant driven by parabolic trough collector for low-solar radiation zone. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46(April), 101230. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101230>

- Avagianos, I., Atsonios, K., Nikolopoulos, N., Grammelis, P., Polonidis, N., Papapavlou, C., & Kakaras, E. (2017b). Predictive method for low load off-design operation of a lignite fired power plant. *Fuel*, 209(April), 685–693. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.042>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2006). *Thermodynamics : An Engineering Approach* (5 th Ed). McGraw-Hill Colege, Boston.
- Chaudhuri, S. (2006). Some aspects of metallurgical assessment of boiler tubes-Basic principles and case studies. *Materials Science and Engineering: A*, 432(1–2), 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.026>
- El wakil, M.Mohamed. Power Plant Technology, The McGraw – Hill book company, Singapore, 1984.
- Khan, M. S., Song, Y., & Xu, C. (2022). Analysis of turbine pressure, feed water temperature and condenser back pressure on performance of power generation system for lead-based reactor. *Case Studies in Thermal Engineering*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102494>
- Madejski, P. (2018). Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method. *Applied Thermal Engineering*, 145, 352–363. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.004>
- Malinowski, L., Lewandowska, M., & Giannetti, F. (2021). Design and optimization of the secondary circuit for the WCLL BB option of the EU-DEMO power plant. *Fusion Engineering and Design*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112642>
- Miao, M., Deng, B., Kong, H., Yang, H., Lyu, J., Jiang, X., & Zhang, M. (2021). Effects of volatile matter and oxygen concentration on combustion characteristics of coal in an oxygen-enriched fluidized bed. *Energy*, 220, 119778. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119778>
- Moran MJ, Shapiro HN. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons Inc.; 2006.
- Nithyanandam, K., Shoaie, P., & Pitchumani, R. (2021). Technoeconomic analysis of thermoelectric power plant condensers with nonwetting surfaces. *Energy*, 227, 120450. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120450>
- Oyedepo, S. O., Fakeye, B. A., Mabinuori, B., Babalola, P. O., Leramo, R. O., Kilanko, O., Dirisu, J. O., Udo, M., Efemwenkikie, U. K., & Oyebanji, J. A. (2020). Thermodynamics analysis and performance optimization of a reheat – Regenerative steam turbine power plant with feed water heaters. *Fuel*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118577>
- Saefulhak, Y. (2023). Outlook energi Indonesia, Jakarta, 2023
- Tang, Z., & Wu, X. (2023). Distributed predictive control guided by intelligent reboiler steam feedforward for the coordinated operation of power plant-carbon capture system. *Energy*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126568>
- Teguh, N. H., Yuliati, L., & Darmadi, D. B. (2022). Effect of seawater temperature rising to the performance of Northern Gorontalo small scale power plant. *Case Studies in Thermal Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101858>
- Thiangchanta, S., Khiewwijit, R., Chainetr, S., & Mona, Y. (2022). Energy reduction for commercial freezer by force convection cooling of heatsink. *Energy Reports*, 8, 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.169>
- Wu, H.-M., & Tafreshi, R. (2019). Observer-based internal model air–fuel ratio control of lean-burn SI engines. *IFAC Journal of Systems and Control*, 9, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2019.100065>
- Yan, H., Chong, D., Wang, Z., Liu, M., Zhao, Y., & Yan, J. (2022). Dynamic performance enhancement of solar-aided coal-fired power plant by control strategy optimization with solar/coal-to-power conversion characteristics. *Energy*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122564>

- Yue, X., Patankar, N., Decarolis, J., Chiodi, A., Rogan, F., Deane, J. P., & O’Gallachoir, B. (2020). Least cost energy system pathways towards 100% renewable energy in Ireland by 2050. *Energy*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118264>
- Yohana, E., Sinaga, F. T. H., Jurusan, D., Mesin, T., Teknik, F., Diponegoro, U., Jurusan, M., Mesin, T., Teknik, F., & Diponegoro, U. (2015). Analisis Pengaruh Kekentalan Fluida Air Dan Minyak Kelapa Pada Performansi Pompa Sentrifugal. *Jurnal Teknik Mesin*, 3(2), 212–219
- Zhang, K., Liu, M., Zhao, Y., Zhang, S., Yan, H., & Yan, J. (2022). Thermo-economic optimization of the thermal energy storage system extracting heat from the reheat steam for coal-fired power plants. *Applied Thermal Engineering*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119008>