

Pengaruh Tekanan Uap Boiler Kecil terhadap Kinerja Mekanis Robinson Engine pada Tekanan Maksimum 2,5 bar

The Effect of Small Boiler Steam Pressure on the Mechanical Performance of the Robinson Engine at a Maximum Pressure of 2.5 bar

Hamdani¹, Jufrizal^{1*}, Muhammad Idris¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Medan Area, Medan 20223, Indonesia

*Corresponding author: jufrizal@staff.uma.ac.id

Diterima: 15-05-2025

Disetujui: 13-08-2025

Dipublikasikan: 20-08-2025

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



Abstrak

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi tekanan uap dari boiler kecil terhadap performa mekanis Robinson Engine pada tekanan maksimum 2,5 bar. Metode eksperimen kuantitatif digunakan dengan empat variasi tekanan (1,0; 1,5; 2,0; dan 2,5 bar). Parameter yang diukur meliputi kecepatan putar, torsi, dan daya, dengan bahan bakar LPG dan volume air sebagai variabel kontrol. Hasil menunjukkan adanya hubungan positif signifikan antara tekanan uap dan kecepatan putar; peningkatan tekanan dari 1,0 bar ke 2,5 bar menaikkan putaran dari 526,2 menjadi 975,6 rpm. Temuan ini menegaskan peran dominan tekanan uap terhadap performa mesin serta memberikan data kuantitatif awal untuk pengembangan pembangkit listrik mikro berbasis energi terbarukan.

Kata Kunci: Robinson Engine, Tekanan uap, Boiler kecil, Kinerja mekanis.

Abstract

This study analyzes the effect of steam pressure variations from a small boiler on the mechanical performance of a Robinson Engine at a maximum pressure of 2.5 bar. A quantitative experimental method was applied with four pressure variations (1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 bar). Performance parameters measured included rotational speed, torque, and power, with LPG fuel and water volume maintained as control variables. Results show a significant positive relationship between steam pressure and engine speed; increasing pressure from 1.0 to 2.5 bar raised the speed from 526.2 to 975.6 rpm. These findings highlight the dominant role of steam pressure in engine performance and provide initial quantitative data for developing micro-scale renewable energy-based power plants.

Keywords: Robinson Engine, Steam pressure, Small boiler, Mechanical performance.

1. Pendahuluan

Perkembangan industri modern yang ditopang oleh kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi menuntut ketersediaan sumber energi yang andal. Salah satu teknologi konversi energi klasik yang kembali mendapat perhatian adalah mesin uap (Damanik et al., 2022). Mesin ini bekerja dengan mengubah energi panas uap air menjadi energi mekanis yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi (Sahri et al., 2024). Walaupun teknologi mesin uap umumnya diidentikkan dengan pembangkit listrik tenaga uap skala besar, penerapan pada skala kecil mulai menjadi relevan, terutama dalam mendukung sistem energi terbarukan dan pembangkit listrik mikro (Nasuha et al., 2025).

Boiler atau ketel uap merupakan komponen utama dalam sistem tenaga uap. Alat ini berfungsi untuk memanaskan air sehingga menghasilkan uap bertekanan yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin atau mesin piston (Ahmadi et al., 2020). Keunggulan mesin uap terletak pada *fleksibilitas* sumber panas yang digunakan, mulai dari bahan bakar fosil hingga biomassa, energi matahari, maupun panas sisa proses industri. Faktor yang paling memengaruhi efisiensi mesin uap adalah tekanan dan suhu uap kerja, karena keduanya berkaitan langsung dengan energi termal yang dapat dikonversikan menjadi kerja mekanis (Arrazi et al., 2023).

Salah satu jenis mesin uap piston sederhana yang menarik untuk dikaji adalah Robinson Engine. Mesin ini dirancang dengan konfigurasi kompak, efisien, serta mudah dioperasikan, sehingga sesuai untuk kebutuhan pendidikan, demonstrasi, maupun pembangkit listrik skala kecil (Karudin et al., 2025). Walaupun prinsip dasar konversi energi pada mesin uap telah lama dipahami, kajian terkait performa mesin piston kecil pada tekanan rendah masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu menitikberatkan pada mesin turbin atau sistem bertekanan tinggi, sehingga hasilnya kurang relevan untuk diaplikasikan pada mesin sederhana berukuran kecil (Fadillah et al., 2021).

Beberapa studi sebelumnya memberikan gambaran mengenai peningkatan efisiensi boiler mini melalui modifikasi desain maupun peningkatan suhu superheat. Misalnya, penelitian oleh Sipayung, (2023) berhasil menunjukkan peningkatan efisiensi boiler mini dengan memperbesar luas bidang pemanas (Sipayung et al., 2023), sedangkan penelitian Syahputra, (2024) memperlihatkan bahwa boiler pipa api vertikal mampu mencapai efisiensi pemanasan 87% pada tekanan 5 bar. Meskipun temuan tersebut berkontribusi pada pengembangan boiler, kajian khusus mengenai dampak tekanan uap rendah terhadap kinerja mesin piston kecil, khususnya Robinson Engine, masih jarang dilakukan (Syahputra et al., 2024).

Berdasarkan penelitian terdahulu, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis pengaruh variasi tekanan uap dari boiler kecil terhadap kinerja mekanis Robinson Engine pada tekanan maksimum 2,5 bar. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan data kuantitatif yang komprehensif terkait hubungan tekanan uap dengan parameter kinerja seperti torsi, daya, dan kecepatan putar. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyediaan data empiris mengenai mesin uap skala kecil bertekanan rendah yang dapat mendukung pengembangan sistem energi terbarukan berbasis pembangkit listrik mikro dimasa mendatang.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif untuk menganalisis pengaruh variasi tekanan uap dari boiler kecil terhadap kinerja mekanis Robinson Engine pada tekanan maksimum 2,5 bar. Metode ini dipilih untuk memperoleh data numerik yang dapat digunakan dalam menguji hipotesis serta memahami hubungan sebab-akibat antara variabel bebas dan variabel terikat.

2.1. Desain Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan lima variasi tekanan uap, yaitu 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; dan 2,5 bar.

- Variabel bebas: tekanan uap boiler.
- Variabel terikat: kinerja mekanis mesin yang diukur dalam bentuk torsi (Nm), daya (W), dan putaran mesin (RPM).
- Variabel kontrol: jenis bahan bakar (LPG), volume air dalam boiler, serta kondisi lingkungan saat pengujian.

2.2. Alat dan Bahan

Alat utama yang digunakan meliputi boiler kecil bertekanan rendah (Gambar 1), mesin Robinson (Gambar 2), generator mini dan beban (Gambar 3), serta rangkaian instrumen ukur (Gambar 4). Instrumen pengukuran yang digunakan terdiri atas pressure gauge untuk tekanan, tachometer untuk kecepatan putar, wattmeter DC untuk daya listrik, serta termometer dan termometer inframerah (infrared thermometer gun) untuk memantau suhu uap dan suhu sisi panas. Seluruh alat ukur dikalibrasi terlebih dahulu untuk memastikan akurasi data.



Gambar 1. Boiler



Gambar 2. Mesin Robinson



Gambar 3. Generator dan Lampu



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4. Alat-alat ukur yang digunakan

2.3. Prosedur Eksperimen

Sebelum pengujian dimulai, dilakukan pengecekan sistem termasuk sambungan pipa, katup, serta fungsi alat ukur dan katup pengaman boiler. Boiler kemudian diisi air dan dipanaskan menggunakan kompor berbahan bakar LPG hingga mencapai tekanan awal 0,5 bar. Setelah itu, katup uap dibuka untuk menggerakkan Robinson Engine, dan pengambilan data dilakukan pada kondisi stabil.

Pengujian diulang untuk setiap level tekanan hingga maksimum 2,5 bar. Pada setiap tekanan, parameter yang diukur meliputi suhu uap, suhu sisi panas, putaran mesin, tegangan dan arus keluaran generator, serta daya listrik yang dihasilkan. Setiap variasi tekanan diulang tiga kali untuk memperoleh data rata-rata yang lebih representatif.

2.4. Teknik Analisis Data

Data hasil eksperimen dianalisis secara deskriptif dan dilanjutkan dengan regresi linear untuk mengetahui hubungan antara tekanan uap, suhu sisi panas, dan putaran mesin. Analisis error dilakukan untuk mengevaluasi ketidakpastian data, terutama pada pengukuran suhu uap yang menunjukkan fluktuasi kecil. Hasil analisis ini digunakan untuk menilai sejauh mana tekanan uap berperan sebagai faktor dominan dalam menentukan performa mekanis mesin. Dalam pengujian tersebut beban dari bola lampu diatur konstan, kemudian data kecepatan putar, tegangan listrik, arus listrik, dan lain-lain dicatat selama 5 menit sekali. Periode ini dipilih untuk mendapatkan data yang cukup banyak dan stabil dengan cara melakukan pengulangan pada

Tekanan Berbeda dengan tekanan uap ditingkatkan ke level berikutnya (0,5 bar, 1 bar, 1,5 bar, 2,0 bar, dan 2,5 bar).

Tahap eksperimen Seluruh prosedur dari langkah 2 sampai 4 diulang sebanyak tiga kali dengan tujuan adalah untuk praktik standar dalam penelitian eksperimental untuk memastikan validitas dan reliabilitas data. Data rata-rata dari tiga kali pengulangan digunakan untuk analisis akhir.

2.5. Instrumen Pengukuran dan Kalibrasi

Akurasi data bergantung pada keandalan instrumen. Kalibrasi sensor tekanan, torsi, dan putaran dikalibrasi secara rutin. Sensor tekanan dikalibrasi dengan membandingkan pembacaannya dengan manometer standar yang telah disertifikasi. Kemudian sensor torsi diverifikasi menggunakan metode beban statis, yaitu dengan menggantung beban yang diketahui pada lengan torsi.

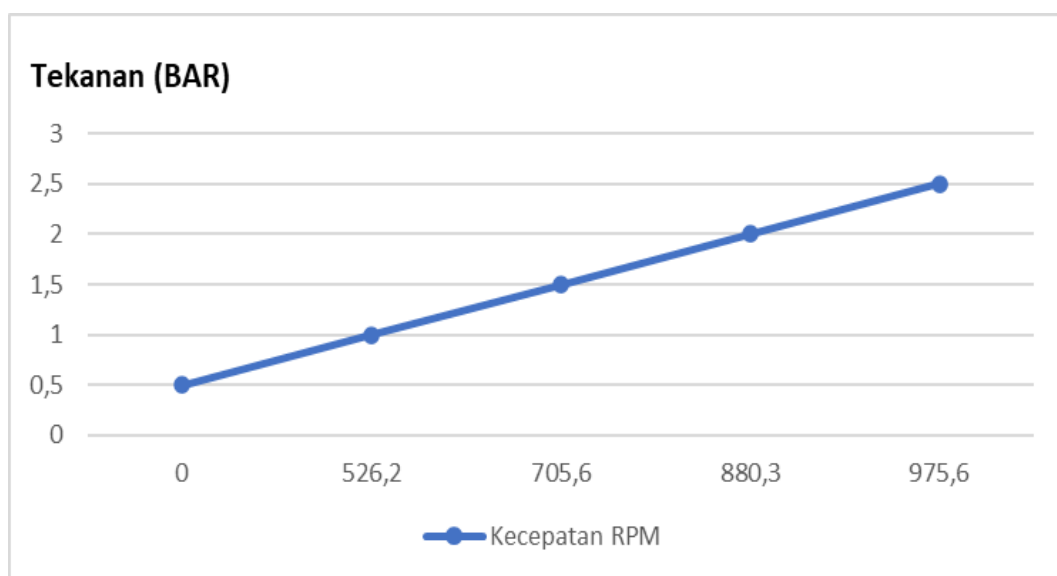
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Eksperimen

Pengujian dilakukan pada lima variasi tekanan uap, yaitu 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; dan 2,5 bar. Parameter yang diukur meliputi suhu uap, suhu sisi panas, kecepatan putar, tegangan, arus, serta daya listrik. Hasil rata-rata pengukuran dari tiga kali pengulangan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian

Tekanan (Bar)	Suhu Uap (°C)	Suhu Sisi Panas (°C)	Putaran (Rpm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Listrik (W)
0,5	0	0	0	0	0	0
1	98,9	39,2	526,2	2,72	1,27	3,5
1,5	98,7	48,8	705,6	3,28	1,35	4,4
2	98,4	50,4	880,3	3,48	1,35	5,3
2,5	98,8	56,2	975,6	4,52	1,35	6,1



Gambar 5. Grafik Hubungan Pengukuran antara Tekanan dan putaran

Data menunjukkan adanya peningkatan putaran yang konsisten seiring bertambahnya tekanan uap. Pada tekanan 1,0 bar, mesin berputar pada 526,2 rpm, sedangkan pada 2,5 bar meningkat hingga 975,6 rpm. Peningkatan sebesar 1,5 bar menghasilkan kenaikan putaran 449,4

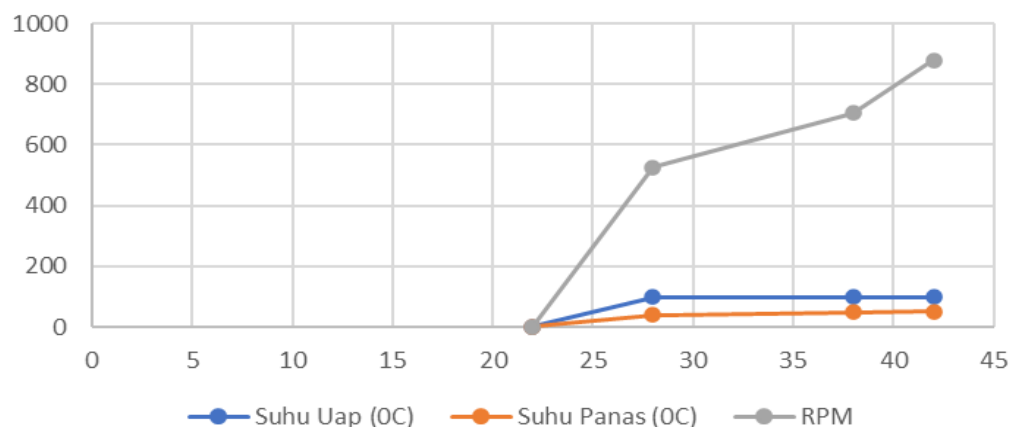
rpm. Sementara itu, suhu sisi panas meningkat dari 39,2 °C pada 0,5 bar menjadi 56,2 °C pada 2,5 bar, sedangkan suhu uap relatif stabil antara 98,4–98,9 °C. Grafik hubungan antara tekanan dan putaran ditunjukkan pada Gambar 5.

3.2. Analisis Hubungan Tekanan, Suhu, dan Kinerja Mesin

Hasil pengukuran menunjukkan korelasi positif yang kuat antara tekanan uap dan kecepatan putar mesin. Peningkatan tekanan menghasilkan gaya dorong piston yang lebih besar sesuai dengan hukum dasar mekanika fluida. Hal ini berdampak langsung pada kenaikan torsi dan daya yang dihasilkan mesin. Gambar 6 adalah grafik hasil pengukuran terhadap waktu, suhu uap, suhu panas dan putaran.

Gambar 6 memperlihatkan hubungan antara waktu pengujian, suhu uap, suhu sisi panas, dan putaran mesin pada Robinson Engine yang dioperasikan dengan boiler kecil. Hasil pengukuran menunjukkan adanya pola yang berbeda antara variabel suhu uap, suhu sisi panas, dan kecepatan putar mesin.

Suhu sisi panas juga menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya tekanan, yang menandakan peningkatan efisiensi transfer panas dari sumber energi ke fluida kerja. Sebaliknya, suhu uap relatif konstan, sehingga dapat diasumsikan bahwa uap yang dihasilkan berada dalam kondisi jenuh. Fluktuasi kecil pada data suhu uap kemungkinan besar disebabkan oleh keterbatasan instrumen pengukuran.



Gambar 6. Hasil Pengukuran Waktu, Suhu Uap, Suhu Panas dan putaran

Suhu uap relatif konstan pada kisaran 98,4–98,9 °C sepanjang durasi pengujian. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa uap yang dihasilkan masih berada dalam kondisi jenuh, sehingga peningkatan tekanan tidak secara signifikan memengaruhi suhu uap. Fluktuasi kecil yang tercatat lebih mungkin disebabkan oleh keterbatasan instrumen pengukuran dibandingkan perubahan kondisi termodinamika sistem.

Berbeda dengan suhu uap, suhu sisi panas menunjukkan tren peningkatan yang jelas seiring bertambahnya waktu pengujian, dari 39,2 °C pada awal pengujian hingga mencapai 56,2 °C pada tekanan maksimum. Peningkatan suhu sisi panas ini mencerminkan efisiensi transfer energi dari proses pembakaran LPG ke fluida kerja. Semakin tinggi tekanan, semakin besar pula energi termal yang diterima oleh sistem, yang kemudian berkontribusi terhadap peningkatan kinerja mesin.

Kecepatan putar mesin memperlihatkan kenaikan yang signifikan dari 526,2 menjadi 975,6 rpm pada rentang waktu yang sama. Kenaikan ini menunjukkan adanya korelasi positif yang kuat antara tekanan uap dan output mekanis mesin. Secara prinsip termodinamika, semakin

tinggi tekanan uap yang masuk ke silinder, semakin besar gaya dorong yang dihasilkan pada piston. Hal ini berimplikasi langsung pada peningkatan torsi dan daya, yang tercermin dari pertumbuhan eksponensial nilai putaran.

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi Wibowo dan Purnomo (2020) yang melaporkan peningkatan kinerja mesin uap turbin pada suhu superheat tinggi. Penelitian ini lebih spesifik pada mesin piston kecil dengan tekanan rendah. Studi oleh Sipayung, (2023) yang memodifikasi boiler mini untuk meningkatkan luas permukaan pemanas juga mendukung temuan bahwa efisiensi sistem uap berbanding lurus dengan peningkatan tekanan dan kualitas uap (Sipayung et al., 2023). Demikian pula, penelitian Syahputra dkk. (2024) yang berhasil meningkatkan efisiensi boiler hingga 87% pada tekanan 5 bar menunjukkan relevansi pentingnya pengendalian tekanan uap.

Penelitian ini terletak pada fokusnya pada Robinson Engine berukuran kecil dengan batasan tekanan rendah maksimum 2,5 bar. Kajian kuantitatif mengenai kinerja mesin piston sederhana pada tekanan rendah masih jarang dilakukan. Penelitian ini memberikan kontribusi empiris baru yang dapat menjadi dasar pengembangan sistem pembangkit listrik mikro berbasis energi terbarukan. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, suhu uap yang stabil menunjukkan bahwa sistem masih berada pada fase uap jenuh, sehingga tidak memperlihatkan karakteristik uap superheat. Kedua, efisiensi termal keseluruhan sistem (dari bahan bakar hingga daya keluaran) belum dihitung, sehingga evaluasi performa masih terbatas pada parameter mekanis. Kajian lebih lanjut dengan pengukuran efisiensi energi menyeluruh diperlukan untuk melengkapi hasil penelitian ini

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menunjukkan adanya hubungan positif yang kuat antara variasi tekanan uap boiler kecil dan kinerja mekanis Robinson Engine pada tekanan maksimum 2,5 bar. Peningkatan tekanan uap dari 1,0 bar hingga 2,5 bar menyebabkan kenaikan kecepatan putar mesin dari 526,2 RPM menjadi 975,6 RPM, dengan peningkatan daya dari 3,5 W menjadi 6,1 W. Temuan ini menegaskan bahwa tekanan uap merupakan faktor dominan yang mempengaruhi performa mekanis mesin uap piston kecil.

Kontribusi utama penelitian ini adalah penyediaan data kuantitatif awal mengenai kinerja mesin uap skala kecil bertekanan rendah, sebuah bidang yang masih jarang dikaji. Hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar untuk pengembangan sistem pembangkit listrik mikro berbasis energi terbarukan, terutama di wilayah terpencil yang membutuhkan solusi energi sederhana, andal, dan berbiaya rendah.

Daftar Pustaka

- Affandi, Marwan, Ilmi Abdullah, and Nurul Syahirah Khalid. 2015. "MATLAB as a tool for the teaching of Rankine cycle with simulation of a simple steam power plant." *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)* 77.28.
- Ahmadi, B., A. A. Golneshan, H. Arasteh, A. Karimipour, and Q. V. Bach. 2020. "Energy and Exergy Analysis and Optimization of a Gas Turbine Cycle Coupled by a Bottoming Organic Rankine Cycle." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 141 (1): 495–510. <https://doi.org/10.1007/S10973-019-09088-6>.
- Arrazi, M., A. Efisiensi Turbin, P. Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Jurusan Teknik Elektro, and P. Negeri Lhokseumawe. 2023. "Analisis Efisiensi Turbin Uap Sebagai Penggerak Generator Pabrik Minyak Kelapa Sawit PT. Syaukath Sejahtera (Gandapura)." *Jurnal TEKTR0* 7 (1): 91–97. <https://doi.org/10.30811/TEKTRO.V7I1.3867>.

- Cengel, Yunus A., and Michael A. Bole. 2006. *Thermodynamics An Engineering Approach*. Fifth Edit. McGraw-Hill.
- Damanik, D., J. Simanjuntak, H. H. Sinaga, K. A. Simangunsong, L. C. Silitonga, and R. Nainggolan. 2022. "Purwarupa Miniatur Water Tube Boiler Menggunakan Bahan Bakar Gas Kapasitas Uap 20 kg/jam." *Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/article/view/743>.
- Fadillah, N., I. Kemala Dewi, R. Nainggolan, T. Konversi Energi, T. Mesin, and P. N. Medan. 2021. "Pengujian Efisiensi Ketel Uap Pipa Air Mini Kapasitas 20 Kg/Jam Tekanan Kerja 3 Bar." *Prosiding Konferensi Nasional Social & Engineering Polmed (KONSEP) 2* (1): 191–200. <https://ojs.polmed.ac.id/index.php/KONSEP2021/article/view/602>.
- Jufrizal, F. H. Napitupulu, Ilmi, H. Ambarita, and M. Meliala. 2022a. "Ideal Cycle Thermodynamic Analysis For Gamma-Type Stirling Engine." *Journal of Mechanical Engineering and Technology (JMET)* 14 (2): 1–15.
- Jufrizal, Farel H. Napitupulu, Ilmi, Himsar Ambarita, and Mahadi Meliala. 2022b. "Thermodynamic Analysis of a Gamma-Type Stirling Engine for MCHP Application." In *Proceedings of the 7th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials (ICE-SEAM 2021)*, edited by Mohd Fadzli Bin Abdollah, Hilmi Amiruddin, Amrik Singh Phuman Singh, Fudhail Abdul Munir, and Asriana Ibrahim, 225–229. Melaka, Malaysia: Springer Nature Singapore. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-3179-6_40.
- Karudin, A., D. Leni, U. Usmeldi, A. Purnama, and Y. Akbar. 2025. "Implementasi Prototipe Trainer Turbin Uap Sebagai Media Pembelajaran SMKN 1 Sumatera Barat." *Jurnal Vokasi* 9 (1): 43–54. <https://doi.org/10.30811/VOKASI.V9i1.6231>.
- Nasuha, C., H. S. Kuningan, and J. F. T. 2025. "Optimalisasi Turbin Uap Panas Bumi Skala Kecil Sebagai Inovasi Teknologi Energi Bersih di Indonesia." *Jurnal.Unisa.Ac.Id* 6 (2): 2746–220. <https://doi.org/10.70476/jft.v6i2.4>.
- Sahri, A., G. W. Nurcahyo, and B. Hendrik. 2024. "Efektivitas Metode Multi Attribute Utility Theory Dalam Menentukan Tingkat Keaktifan Belajar Siswa." *Jurnal KomtekInfo* 11 (4): 281–289. <https://doi.org/10.35134/KOMTEKINFO.V11i4.560>.
- Simanjuntak, Eli, Muhammad Idris, and Jufrizal Jufrizal. 2023. "Analysis Of Boiler Performance Using Fiber And Shell Combinations In A Takuma N-600 SA". *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 2 (1):34-42. <https://doi.org/10.56862/iraitma.v2i1.41>.
- Sipayung, A., A. Pakpahan, D. H. Tambunan, and Y. Tarigan. 2023. "Modifikasi Boiler Kapasitas 25 Kg/Jam Tekanan 4 Bar Dengan Memperbesar Bidang Luas Pemanas." *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* 4 (2): 35–44. <https://doi.org/10.51510/SINERGIPOLMED.V4i2.1063>.
- Sipayung, A., A. Pakpahan, D. T., and J. I. T. 2023. "Modifikasi Boiler Kapasitas 25 Kg/Jam Tekanan 4 Bar dengan Memperbesar Bidang Luas Pemanas." *Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/article/view/1063>.
- Syahputra, B., K. Syah, A. Gafur, and P. N. Bengkalis. 2024. "Rancang Bangun Boiler Vertikal Pipa Api Kapasitas 100 Kg/Jam." *Seminar Nasional Industri dan Teknologi*, 285–92. <https://eprosiding.snit-polbeng.org/index.php/snit/article/view/603>.