

Studi Eksperimental Pengaruh pH Pendingin Mesin terhadap Suhu Kerja dan Emisi Gas Buang pada Motor 4 Silinder

Diama Rizky Septiawan^{1*}, Wijoyo², Agus Dwi Putra³, Eko Surjadi⁴, Faqih Fadillah⁵

^{1,3,5} Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Malang

^{2,4} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Surakarta, Surakarta

*Penulis Korespondensi, email: diamai.rizky@polinema.ac.id

Received: 14/10/2025

Revised: 06/11/2025

Accepted: 06/11/2025

Abstract. The purpose of this research is to obtain a coolant with the ability to withstand longer engine operating temperatures (low engine operating temperatures) and lower engine emissions. Radiator coolant is a coolant that is usually used in radiators. This component has a function to control the temperature inside the vehicle engine so that it is not excessive because it can cause overheating and damage to the car engine. The use of plain or mineral water cannot maximize coolant in cooling the engine. In this study the method used is the experimental method to test whether the experimental variables are effective or not. Independent Variables, variations in the type of cooling fluid, Dependent Variable, engine working temperature and exhaust emissions, Control variable, room temperature when data collection. The results showed that the highest working temperature was obtained by using distilled water with a degree of acidity (pH) 6.32, namely 89.5 oC and the lowest engine working temperature was by using Water coolant type cooling fluid (pH 8.04) 85 oC and using Water coolant (pH 8.04) as a cooling fluid can reduce exhaust emissions of CO at 0.13%, HC at 6.8 ppm and NOx at 3.1 ppm. The conclusion obtained is that the lowest engine working temperature is by using a Water coolant type of cooling fluid and can reduce exhaust emissions of CO, HC, and NOx.

Keywords: Coolant, Water coolant, Degree of acidity (pH), Engine operating temperature.

Abstrak. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh pendingin yang mampu menahan suhu operasi mesin lebih lama (suhu operasi mesin rendah) dan mengurangi emisi mesin. Pendingin radiator adalah pendingin yang biasanya digunakan pada radiator. Komponen ini berfungsi untuk mengontrol suhu di dalam mesin kendaraan agar tidak berlebihan karena dapat menyebabkan mesin panas berlebih dan merusak mesin mobil. Penggunaan air biasa atau air mineral tidak dapat memaksimalkan kinerja pendingin dalam mendinginkan mesin. Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah metode eksperimental untuk menguji apakah variabel eksperimen efektif atau tidak. Variabel Independen, variasi jenis cairan pendingin, Variabel Dependen, suhu kerja mesin dan emisi knalpot, Variabel Kontrol, suhu ruangan saat pengumpulan data. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu kerja tertinggi diperoleh dengan menggunakan air suling dengan tingkat keasaman (pH) 6,32, yaitu 89,5 oC dan suhu kerja mesin terendah. Hasil menunjukkan bahwa suhu kerja tertinggi diperoleh dengan menggunakan air suling dengan tingkat keasaman (pH) 6,32, yaitu 89,5 oC, dan suhu kerja mesin terendah adalah dengan menggunakan cairan pendingin jenis *Water coolant* (pH 8,04) 85 oC. Penggunaan *Water coolant* (pH 8,04) sebagai cairan pendingin dapat mengurangi emisi gas buang CO sebesar 0,13%, HC sebesar 6,8 ppm, dan NOx sebesar 3,1 ppm. Kesimpulan yang diperoleh adalah bahwa suhu kerja mesin terendah diperoleh dengan menggunakan cairan pendingin jenis *Water coolant* dan dapat mengurangi emisi gas buang CO, HC, dan NOx.

Kata Kunci: Cairan pendingin, *Water coolant*, Tingkat keasaman (pH), Suhu kerja mesin.

I. PENDAHULUAN

Dalam industri otomotif, mesin kendaraan merupakan komponen vital yang menentukan performa, efisiensi bahan bakar, serta tingkat emisi gas buang. Sistem pendinginan memiliki peran penting dalam menjaga suhu kerja mesin agar tetap stabil dan mencegah terjadinya *overheating* yang

dapat menurunkan kinerja maupun merusak komponen mesin [1]. Fluida pendingin atau *coolant* berfungsi menyerap panas yang dihasilkan dari proses pembakaran dan mengalirkannya ke radiator agar dapat dilepaskan ke udara sekitar [2]. Jenis fluida pendingin yang digunakan akan sangat memengaruhi efektivitas pendinginan karena

perbedaan karakteristik seperti viskositas, titik didih, dan tingkat keasaman (pH).

Secara umum, air biasa masih sering digunakan sebagai fluida pendingin karena mudah didapat dan murah. Namun, penggunaan air biasa memiliki kelemahan seperti titik didih yang rendah, mudah menguap, dan berpotensi menimbulkan korosi akibat kandungan mineral di dalamnya [3]. Oleh sebab itu, dikembangkan radiator *coolant* yang mengandung bahan kimia seperti *ethylene glycol*, propylene glycol, dan zat aditif anti-karat agar dapat meningkatkan titik didih dan mencegah terjadinya korosi [4]. Radiator *coolant* terbukti mampu menjaga suhu mesin tetap stabil dibandingkan dengan air biasa, terutama pada kondisi kerja mesin yang berat [5].

Derajat keasaman (pH) fluida pendingin juga menjadi faktor penting dalam kinerja sistem pendinginan. Fluida dengan pH terlalu rendah cenderung bersifat korosif terhadap logam di sistem pendinginan, sedangkan pH yang terlalu tinggi dapat menimbulkan endapan yang menghambat sirkulasi cairan [6]. Kondisi ini dapat memengaruhi efisiensi perpindahan panas dan menyebabkan meningkatnya suhu kerja mesin. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa variasi pH fluida pendingin berpengaruh signifikan terhadap suhu kerja mesin dan kadar emisi gas buang seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan nitrogen oksida (NOx) [7][8].

Emisi gas buang yang dihasilkan mesin pembakaran dalam merupakan salah satu penyumbang utama pencemaran udara. Gas buang seperti CO, HC, dan NOx terbentuk akibat proses pembakaran yang tidak sempurna dan suhu kerja mesin yang tinggi [9]. Dengan menggunakan fluida pendingin yang tepat, suhu kerja mesin dapat dijaga pada rentang ideal sehingga proses pembakaran menjadi lebih efisien dan emisi gas buang dapat ditekan [10]. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pH fluida pendingin terhadap suhu kerja mesin dan emisi gas buang pada motor bensin 4-tak 4 silinder.

Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada perbandingan jenis bahan

pendingin, seperti air dan *coolant* berbasis *ethylene glycol*, tanpa mengulas secara mendalam pengaruh variasi pH terhadap performa pendinginan dan emisi gas buang. Padahal, variasi pH dapat memengaruhi karakteristik kimia fluida pendingin, termasuk potensi korosi, pembentukan kerak, serta kemampuan perpindahan panas pada sistem pendinginan. Oleh karena itu, masih terdapat kesenjangan penelitian (research gap) dalam memahami hubungan antara tingkat keasaman fluida pendingin dengan stabilitas suhu kerja mesin dan emisi gas buang.

Penelitian ini dilakukan untuk menutup kesenjangan tersebut dengan mengkaji pengaruh variasi pH fluida pendingin terhadap suhu kerja mesin dan emisi gas buang pada motor bensin 4-tak 4 silinder. Selain itu tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan fluida pendingin yang memiliki kemampuan terbaik dalam menstabilkan suhu kerja mesin serta menurunkan kadar emisi gas buang. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan sistem pendinginan mesin yang lebih efisien dan ramah lingkungan serta menjadi referensi bagi pengguna kendaraan dalam memilih fluida pendingin yang optimal [8][11].

II. METODOLOGI

Metodologi penelitian ini menjelaskan tahapan-tahapan yang dilakukan untuk menyelesaikan masalah dan mengkaji pengaruh pH fluida pendingin terhadap suhu kerja mesin serta emisi gas buang pada motor 4-tak 4 silinder. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Surakarta.

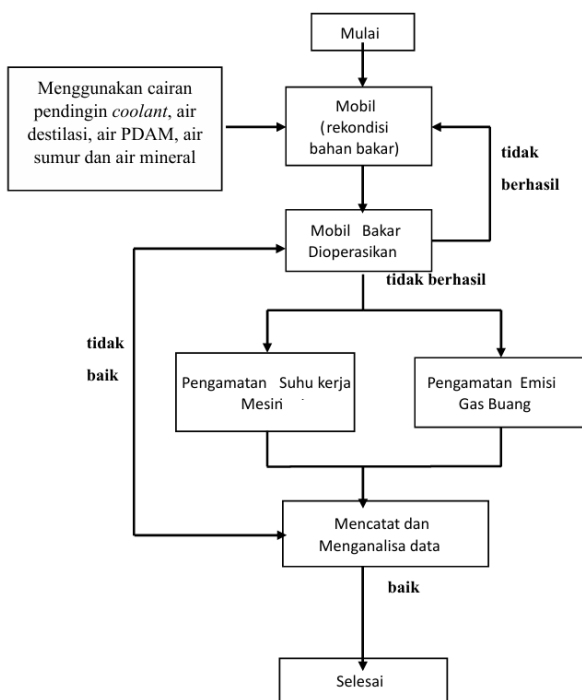
A. Desain penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen. Penelitian eksperimental dilakukan untuk mengetahui hubungan sebab-akibat antara variabel bebas dan variabel terikat [12][13].

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel bebas: Jenis fluida pendingin (air sumur, air destilasi, air mineral, air PDAM, dan air *coolant*).
2. Variabel terikat: Suhu kerja mesin dan emisi gas buang (CO, HC, NOx).
3. Variabel kontrol: Suhu lingkungan dan putaran mesin.

Tahapan penelitian secara umum digambarkan melalui diagram alir penelitian seperti pada Gambar 1 (dalam naskah asli), yang terdiri dari persiapan, pengujian, pengambilan data, dan analisis hasil.



Gambar 1. Dagram Alir Penelitian

B. Alat dan bahan

Penelitian ini menggunakan alat dan bahan sebagai berikut:

1. Mobil uji: Toyota Avanza 1 NR-VE.
2. G-Scan: Alat untuk mengukur suhu kerja mesin melalui *On Board Diagnostic* (OBD).



Gambar 2. G-Scan

(Sumber: Marta, et al, 2020) [14].

3. Gas Analyzer: Alat untuk mengukur kadar CO, HC, dan NOx pada gas buang.



Gambar 3. Gas Analyzer

(Sumber: Jayle, et al, 2015) [15]

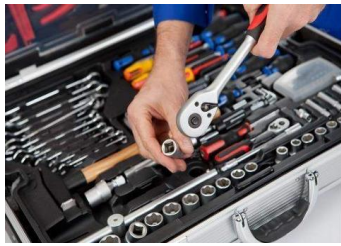
4. pH Meter: Alat pengukur tingkat keasaman cairan pendingin.



Gambar 4. pH Meter

(Sumber: Yani, et al, 2020) [16]

5. Tool Box: Peralatan untuk pembongkaran dan pemasangan sistem pendingin.



Gambar 5. Tool Box

(Sumber: Mantesh, et al, 2021) [17]

6. Jenis fluida pendingin: Air sumur, air PDAM, air mineral, air destilasi, dan air *coolant*.

C. Prosedur Penelitian

1. Tahap Persiapan
 - a. Melakukan pemeriksaan kondisi mesin uji dan sistem pendingin.
 - b. Mengganti cairan pendingin sesuai variasi yang ditentukan.
 - c. Menyiapkan alat ukur dan melakukan kalibrasi.
2. Tahap Pengujian Suhu Kerja Mesin
 - a. Menghidupkan mesin dan membiarkannya hingga mencapai suhu kerja.
 - b. Menggunakan alat G-Scan untuk mencatat suhu kerja mesin setiap jenis fluida pendingin.
3. Tahap Pengujian Emisi Gas Buang
 - a. Menghubungkan Gas *Analyzer* pada knalpot kendaraan.
 - b. Mencatat kadar CO, HC, dan NOx pada setiap jenis fluida pendingin.
4. Tahap Analisis Data
 - a. Data suhu kerja mesin dan emisi gas buang diolah dan dibandingkan antar jenis fluida.
 - b. Hasil pengujian diinterpretasikan untuk menentukan hubungan antara pH fluida pendingin dengan performa pendinginan dan tingkat emisi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengaruh Variasi pH Pendingin

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi pH fluida pendingin terhadap suhu kerja mesin dan emisi gas buang pada mesin bensin 4-tak 4 silinder. Pengujian dilakukan menggunakan lima jenis fluida pendingin, yaitu air sumur, air destilasi, air mineral, air PDAM, dan air *coolant*. Data hasil pengukuran pH, suhu kerja mesin, serta kadar emisi gas buang (CO, HC, dan NOx)

diperoleh melalui G-Scan dan Gas *Analyzer* di Laboratorium Konversi Energi Universitas Surakarta.

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Derajat Keasaman (pH) Fluida Pendingin.

Jenis Fluida Pendingin	Derajat Keasaman (PH)
Air Sumur	5,57
Air Destilasi	6,32
Air Mineral	6,13
Air <i>Coolant</i>	8,04
Air PDAM	6,23

(Sumber: pH meter)

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Suhu Kerja Mesin (SKM).

Jenis Fluida Pendingin	Suhu Kerja mesin (°C)
Air Sumur	88
Air Destilasi	89,5
Air Mineral	87,5
Air <i>Coolant</i>	85
Air PDAM	89

(Sumber: *Thermometer* (G-Scan))

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Emisi Gas Buang.

Jenis Fluida Pendingin	Kadar CO (%)	Kadar HC (ppm)	Kadar Nox (ppm)
Air Destilasi	0,15	8,2	3,4
Air Sumur	0,17	7,9	3,5
Air Mineral	0,16	7,6	3,6
Air <i>Coolant</i>	0,13	6,8	3,1
Air PDAM	0,18	8,1	3,7

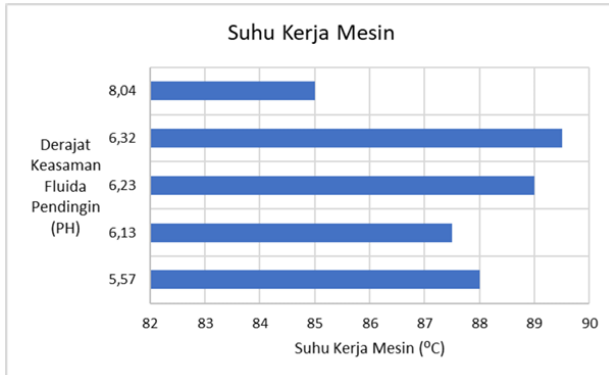
(Sumber: Gas *Analyzer*)

Berdasarkan hasil tersebut, dapat dilihat bahwa fluida pendingin dengan pH lebih tinggi (air *coolant*, pH 8.04) menghasilkan suhu kerja mesin paling rendah dan emisi gas buang terendah, sementara fluida dengan pH rendah seperti air sumur menunjukkan suhu kerja mesin yang lebih tinggi.

B. Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai pH fluida pendingin berpengaruh signifikan terhadap

suhu kerja mesin dan kadar emisi gas buang. Fluida dengan pH tinggi cenderung memiliki sifat basa yang lebih stabil terhadap perubahan temperatur dan korosi, sehingga dapat mempertahankan kapasitas perpindahan panas lebih baik dibandingkan fluida dengan pH rendah [18][19].

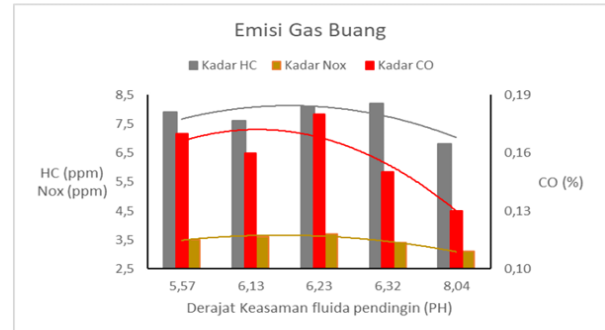


Bagan 1. Hasil Data Pengujian.

Pada fluida dengan pH rendah (asam), seperti air sumur (pH 5.57) dan air destilasi (pH 6.32), kemampuan mendinginkan mesin menurun karena kecenderungan korosi pada saluran pendingin. Korosi dapat menyebabkan terbentuknya kerak yang menghambat aliran cairan pendingin dan menurunkan efisiensi perpindahan panas [20]. Secara teori, penambahan resistansi ini menghambat konduksi panas dari dinding silinder menuju fluida pendingin, sehingga suhu kerja mesin meningkat. Akibatnya, energi panas yang tertahan dalam ruang bakar menyebabkan kenaikan temperatur gas pembakaran dan memperbesar potensi pembentukan gas buang berbahaya seperti NOx. Akibatnya, suhu kerja mesin meningkat dan emisi gas buang menjadi lebih tinggi.

Sebaliknya, pada penggunaan air *coolant* (pH 8.04), suhu kerja mesin turun hingga 85°C. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi kimia dalam *coolant* seperti *ethylene glycol* dan aditif anti-karat mampu meningkatkan titik didih serta memperbaiki perpindahan panas [21]. *Coolant* juga mengandung zat pencegah oksidasi logam sehingga mengurangi risiko korosi pada radiator dan blok mesin [22]. Selain itu hal ini dapat dijelaskan melalui teori perpindahan panas konveksi: fluida dengan viskositas lebih rendah dan kestabilan kimia yang baik akan meningkatkan koefisien perpindahan

panas (h), sehingga laju perpindahan panas $Q=hA(T_s-T_f)$ menjadi lebih besar. Kandungan *ethylene glycol* dan aditif anti-karat dalam *coolant* membantu mempertahankan sifat termal dan mencegah terbentuknya lapisan isolator akibat korosi.



Bagan 2. Emisi Gas Buang dengan Variasi Jenis Cairan Pendingin.

Dari sisi kimia pembakaran, penurunan suhu kerja mesin berdampak langsung terhadap efisiensi pembakaran. Pada suhu yang lebih stabil dan tidak terlalu tinggi, waktu tinggal (*residence time*) bahan bakar–udara dalam ruang bakar menjadi lebih optimal, sehingga proses oksidasi hidrokarbon berlangsung lebih sempurna. Hal ini menjelaskan mengapa kadar CO dan HC turun secara signifikan. Sementara itu, pembentukan NOx yang umumnya meningkat pada suhu pembakaran di atas 1.800 K menjadi berkurang karena penurunan temperatur puncak akibat pendinginan yang lebih efisien.

Dengan demikian, hasil eksperimen ini sejalan dengan teori perpindahan panas dan kimia pembakaran, di mana fluida pendingin dengan pH basa berperan menjaga efisiensi termal mesin dan menekan pembentukan emisi polutan.

Tren penurunan suhu kerja mesin diikuti oleh penurunan kadar CO, HC, dan NOx. Hal ini karena pada suhu kerja yang stabil dan optimal, proses pembakaran bahan bakar berlangsung lebih sempurna. Pembakaran sempurna menghasilkan gas buang dengan kadar CO dan HC yang rendah [23]. Sedangkan penurunan NOx berkaitan dengan menurunnya suhu puncak pembakaran akibat sistem pendinginan yang lebih efisien [1].

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Marwa et al. (2020) yang melaporkan bahwa

penggunaan *coolant* berbasis *ethylene glycol* sebesar 50% memberikan suhu kerja mesin lebih stabil dibanding air biasa [24]. Selain itu, Gondhali et al. (2019) juga menemukan bahwa air dengan pH tinggi menghasilkan pendinginan lebih baik dan waktu pendidihan lebih lama [25].

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa fluida pendingin dengan pH basa (sekitar 8) lebih efektif dalam menjaga kestabilan suhu mesin dan menurunkan kadar emisi gas buang dibandingkan fluida dengan pH netral atau asam. Oleh karena itu, penggunaan radiator *coolant* direkomendasikan untuk menjaga performa mesin dan mengurangi dampak lingkungan dari emisi kendaraan bermotor.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut: Nilai pH fluida pendingin berpengaruh terhadap suhu kerja mesin dan emisi gas buang. Semakin tinggi pH (lebih bersifat basa), semakin rendah suhu kerja mesin dan semakin kecil kadar emisi gas buang yang dihasilkan.

Air *coolant* dengan pH 8,04 memberikan hasil terbaik. Suhu kerja mesin terendah diperoleh pada penggunaan air *coolant*, yaitu sebesar 85°C, dibandingkan dengan air destilasi (89,5°C) dan air sumur (88°C).

Penggunaan air *coolant* juga menurunkan emisi gas buang secara signifikan. Kadar karbon monoksida (CO) turun hingga 0,13%, hidrokarbon (HC) sebesar 6,8 ppm, dan nitrogen oksida (NOx) sebesar 3,1 ppm, dibandingkan dengan penggunaan jenis fluida pendingin lainnya.

Secara keseluruhan, fluida pendingin dengan pH basa lebih efektif dalam menjaga kestabilan suhu kerja mesin serta menekan tingkat emisi gas buang, sehingga direkomendasikan untuk digunakan pada kendaraan bermotor berbasis mesin bensin 4-tak 4 silinder.

Untuk pengguna kendaraan, disarankan menggunakan cairan pendingin khusus (radiator *coolant*) dengan pH sekitar 8 agar suhu kerja mesin tetap stabil dan mencegah terjadinya korosi pada sistem pendingin.

Untuk penelitian selanjutnya, sebaiknya dilakukan pengujian dengan variasi pH yang lebih luas dan menggunakan jenis bahan pendingin berbeda seperti *ethylene glycol* atau nanofluid *coolant* untuk mendapatkan perbandingan yang lebih komprehensif.

Diperlukan pengujian dengan kondisi beban mesin yang bervariasi, agar hasil penelitian dapat menggambarkan performa sistem pendingin pada kondisi nyata kendaraan di jalan raya. Penelitian lanjutan dapat dikembangkan untuk menganalisis aspek lingkungan, seperti dampak limbah fluida pendingin terhadap ekosistem dan upaya daur ulang cairan radiator bekas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Politeknik Negeri Malang dan Universitas Surakarta, atas fasilitas dan dukungan selama proses penelitian ini berlangsung.
2. Tim Laboratorium Konversi Energi, Laboratorium Teknik Otomotif Elektronik POLINEMA dan Bengkel Teknik Mesin Universitas Surakarta, yang telah membantu dalam proses pengujian suhu kerja mesin dan emisi gas buang.
3. Rekan-rekan kerja Politeknik Negeri Malang dan Universitas Surakarta

Penulis berharap hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik mesin, khususnya sistem pendinginan dan efisiensi pembakaran mesin otomotif.

REFERENSI

- [1] J. Liu, Q. Huang, C. Ulishney, and C. E. Dumitrescu, "Machine learning assisted prediction of exhaust gas temperature of a heavy-duty natural gas spark ignition engine," *Appl. Energy*, vol. 300, p. 117413, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117413>.
- [2] M. Holik, M. Živić, Z. Virag, A. Barac, M. Vujanović, and J. Avsec, "Thermo-economic optimization of a Rankine cycle used for waste-heat recovery in biogas cogeneration

- plants,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 232, p. 113897, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113897>.
- [3] Z. Su *et al.*, “Opportunities and strategies for multigrade waste heat utilization in various industries: A recent review,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 229, p. 113769, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113769>.
- [4] A. García, J. Monsalve-Serrano, R. L. Sari, and S. Martínez-Boggio, “Thermal runaway evaluation and thermal performance enhancement of a lithium-ion battery coupling cooling system and battery sub-models,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 202, p. 117884, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117884>.
- [5] V. Mali, R. Saxena, K. Kumar, A. Kalam, and B. Tripathi, “Review on battery thermal management systems for energy-efficient electric vehicles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 151, p. 111611, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111611>.
- [6] H. M. Bilal Ameer *et al.*, “Experimental comparison of performance and emission characteristics of 4-stroke CI engine operated with Roselle and Jatropa biodiesel blends,” *J. Indian Chem. Soc.*, vol. 99, no. 6, p. 100505, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100505>.
- [7] S. G., R. P. Shetty, D. K. M.J., and M. G.R., “Performance and emission modeling of a 4-stroke diesel engine with biodiesel extracts from waste cooking oil blends with ZnO nanoparticle using ELM,” *Mater. Today Proc.*, vol. 52, pp. 1935–1941, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.581>.
- [8] A. Nemati, J. C. Ong, K. M. Pang, S. Mayer, and J. H. Walther, “A numerical study of the influence of pilot fuel injection timing on combustion and emission formation under two-stroke dual-fuel marine engine-like conditions,” *Fuel*, vol. 312, p. 122651, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122651>.
- [9] Y. Cong, H. Gan, and H. Wang, “Parameter investigation of the pilot fuel post-injection strategy on performance and emissions characteristics of a large marine two-stroke natural gas-diesel dual-fuel engine,” *Fuel*, vol. 323, p. 124404, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124404>.
- [10] G. Kaya, “Experimental comparative study on combustion, performance and emissions characteristics of ethanol-gasoline blends in a two stroke uniflow gasoline engine,” *Fuel*, vol. 317, p. 120917, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120917>.
- [11] H. Yu, J. Chen, S. Duan, P. Sun, W. Wang, and H. Tian, “Effect of natural gas injection timing on performance and emission characteristics of marine low speed two-stroke natural gas/diesel dual-fuel engine at high load conditions,” *Fuel*, vol. 314, p. 123127, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123127>.
- [12] L. Liu, Y. Wu, and Y. Wang, “Numerical investigation on the combustion and emission characteristics of ammonia in a low-speed two-stroke marine engine,” *Fuel*, vol. 314, p. 122727, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122727>.
- [13] J. Yuan *et al.*, “Preparation and application of Mg–Al composite oxide/coconut shell carbon fiber for effective removal of phosphorus from domestic sewage,” *Food Bioprod. Process.*, vol. 126, pp. 293–304, 2021, doi: [10.1016/j.fbp.2021.01.004](https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.01.004).
- [14] M. Iglesias-Émbil, A. Valero, A. Ortego, M. Villacampa, J. Vilaró, and G. Villalba, “Raw material use in a battery electric car – a thermodynamic rarity assessment,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 158, no. April, p. 104820, 2020, doi: [10.1016/j.resconrec.2020.104820](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104820).
- [15] J. Lee, B. Bagheri, and H. A. Kao, “A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems,” *Manuf. Lett.*, vol. 3, pp. 18–23, 2015, doi: [10.1016/j.mfglet.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001).
- [16] A. Yani, Y. H. Anoi, and J. Triyatno, “(Ukk) Jurusan Teknik Otomotif Kepada Siswa Smk

- Rigomasi Bontang,” *J. Politek. Negeri Jakarta*, vol. 1, no. 1, pp. 49–54, 2020.
- [17] M. Basappa Khot and M. Prasanna Kumar, “Effect of tool material on thrust force and delamination in the drilling of coconut leaf sheath fibre reinforced polymer composites,” *Mater. Today Proc.*, vol. 47, no. xxxx, pp. 5715–5721, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.061.
- [18] Q. Zha *et al.*, “Highly thermally conductive multifunctional graphene-based composite membrane for remarkable passive heat dissipation and robust superhydrophobicity,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 250, no. February, p. 123469, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123469.
- [19] A. D. Putra, M. Rohman, and M. Sulaiman, “Simulasi Pengaruh Waktu dan Gerak Terhadap Desain Implan Sendi Pinggul,” *J. Pendidik. Tek. Mesin Undiksha*, vol. 09, no. 01, pp. 23–31, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.23887/jptm.v9i1.28885>.
- [20] A. A. Johnson, G. A. Bingham, and C. E. Majewski, “The design and assessment of bio-inspired additive manufactured stab-resistant armour,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 13, no. 2, pp. 49–57, 2018, doi: 10.1080/17452759.2017.1369438.
- [21] Nana Rahdiana, “Pelatihan Mesin Otomotif Bagi Masyarakat Desa Srikamulyan, Menuju Desa Yang Maju, Makmur Dan Mandiri,” *J. Buana Pengabd.*, vol. 1, no. 2, pp. 9–19, 2019, doi: 10.36805/jurnalbuanapengabdian.v1i2.1068.
- [22] Andoko and P. Puspitasari, “Finite element analysis of surface tension on piston due to pressure variation,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1778, 2016, doi: 10.1063/1.4965798.
- [23] T. S. P. Mandouw, V. Suryani, and A. A. Wardana, “Perancangan Aplikasi Smart Home Untuk Monitoring Telur Dan Suhu Freezer Pada Kulkas,” *e-Proceedings Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 2592–2601, 2020.
- [24] M. Eltanahy, S. Forawi, and N. Mansour, “Incorporating Entrepreneurial Practices into STEM Education: Development of Interdisciplinary E-STEM Model in High School in the United Arab Emirates,” *Think. Ski. Creat.*, vol. 37, no. July, p. 100697, 2020, doi: 10.1016/j.tsc.2020.100697.
- [25] S. L. Gondhali, A. D. Dhale, and S. Pagare, “Static Structural Analysis of Car Rim by Finite Element Method,” in *Proceedings of International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation*, H. Vasudevan, V. K. N. Kottur, and A. A. Raina, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 181–193.