



MIFORTEKH (Jurnal Manajemen Informatika & Teknologi)

p-ISSN : 2808-7550 (print) e-ISSN : 2798-0235 (online)

Vol. 5, No. 1, Mei 2025

<https://journal.stiestekom.ac.id/index.php/mifortekh>

Mitigasi Karbon Melalui Pemanfaatan Sampah Plastik Menjadi Paving Blok Plastik: Pendekatan Ekonomi Sirkular untuk Pembangunan Berkelanjutan

Rifo Nur Laksana Restu¹, Rahmat², Dean Anggara Putra³, Jefri Imron⁴, Marhaendra Natawibawa⁵, Hery Sumardiyanto⁶

1,2,3,4,5,6Universitas Sains Indonesia

Email: rifo.nur@lecturer.sains.ac.id¹, rahmat.r@lecturer.sains.ac.id², dean.anggara@lecturer.sains.ac.id³, jefri.imron@sains.lecturer.ac.id⁴,

Marhaendra.natawibawa@sains.lecturer.ac.id⁵, Hery.sumardiyanto@sains.lecturer.ac.id⁶

Article Info

Article history:

Received March 28, 2025

Revised April 15, 2025

Accepted April 24, 2025

Keywords:

Carbon Mitigation

Plastic Waste

Paving Block

Circular Economy

Sustainable Development

Carbon Footprint

ABSTRACT

Global climate change driven by greenhouse gas (GHG) emissions, particularly carbon dioxide (CO₂), has become the greatest challenge of this century. At the same time, the accumulation of plastic waste has emerged as a massive environmental crisis. This paper examines the potential utilization of plastic waste into paving blocks as a carbon mitigation strategy and a waste management solution. This approach not only reduces the volume of plastic waste in the environment but also has the potential to lower the carbon footprint of conventional construction material production and contribute to the circular economy. The analysis involves a comparison of the carbon footprint between plastic-based and conventional paving blocks, as well as an estimation of the carbon mitigation potential at various scales of implementation. The findings indicate that material substitution and the incorporation of plastic into durable products offer significant contributions to emission reduction and foster sustainable development.

Corresponding Author:

Rifo Nur Laksana Restu,

Universitas Sains Indonesia

Jalan Tol Arteri Cibitung No. 50 Kec. Cikarang Barat, Bekasi.

Email: rifo.nur@lecturer.sains.ac.id



Abstraksi : Perubahan iklim global yang didorong oleh emisi gas rumah kaca (GHG), terutama karbon dioksida (CO₂), menjadi tantangan terbesar abad ini. Pada saat yang sama, akumulasi sampah plastik telah menjadi krisis lingkungan yang masif. Jurnal ini mengkaji potensi pemanfaatan sampah plastik menjadi paving block sebagai strategi mitigasi karbon dan solusi pengelolaan limbah. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi volume sampah plastik di lingkungan, tetapi juga berpotensi menurunkan jejak karbon dari produksi material konstruksi konvensional dan berkontribusi pada ekonomi sirkular. Analisis melibatkan perbandingan jejak karbon antara paving block plastik dan konvensional, serta estimasi potensi mitigasi karbon dari skala implementasi. Hasil

penelitian menunjukkan bahwa substitusi material dan penyerapan plastik ke dalam produk tahan lama menawarkan kontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi dan mendorong pembangunan berkelanjutan.

Kata kunci : Carbon Mitigation, Plastic Waste, Paving Block, Circular Economy, Sustainable Development, Carbon Footprint

1. PENDAHULUAN

Dua isu lingkungan paling mendesak di abad ke-21 adalah perubahan iklim dan polusi plastik. Laporan IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) secara konsisten menekankan urgensi dekarbonisasi untuk membatasi kenaikan suhu global di bawah 1.5°C (IPCC, 2023). Industri konstruksi, yang sangat bergantung pada bahan baku yang intensif energi seperti semen dan agregat, menyumbang porsi signifikan terhadap emisi CO₂ global (IEA, 2021). Di sisi lain, produksi plastik global mencapai lebih dari 400 juta ton per tahun, dengan sebagian besar berakhir di TPA, dibakar, atau mencemari ekosistem (Wang et al., 2025)(Le et al., 2025)(Fauziah & Bait, 2020)(Sun et al., 2025).

Konsep ekonomi sirkular menawarkan kerangka kerja untuk mengatasi kedua tantangan ini secara simultan, dengan mengubah limbah menjadi sumber daya yang berharga (Pihkola et al., 2025). Pemanfaatan sampah plastik sebagai bahan baku dalam produk konstruksi, seperti paving block, muncul sebagai solusi inovatif. Paving block plastik berpotensi mengurangi permintaan akan material virgin, mengunci karbon dalam produk yang tahan lama, dan menyediakan alternatif yang berkelanjutan untuk material konvensional. Metode penelitian dibuat menggunakan flow chart, Penelitian ini bertujuan untuk:

- 1) Menganalisis dampak lingkungan, khususnya jejak karbon, dari produksi paving block konvensional dan paving block plastik
- 2) Mengidentifikasi mekanisme mitigasi karbon melalui pemanfaatan sampah plastik; dan,
- 3) Mengevaluasi potensi penerapan skala besar dari teknologi ini dalam konteks ekonomi sirkular.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Sampah Plastik dan Dampaknya

Plastik telah menjadi bagian integral dari kehidupan modern karena sifatnya yang ringan, tahan lama, dan serbaguna. Namun, umur panjangnya juga berarti plastik membutuhkan waktu ratusan tahun untuk terurai, menyebabkan masalah polusi yang parah. Mikroplastik dan nanoplastik telah ditemukan di seluruh ekosistem, dari puncak gunung hingga dasar laut, bahkan dalam rantai makanan manusia (Geyer et al., 2017).

2.2 Mitigasi Karbon dalam Industri Konstruksi

Industri konstruksi adalah salah satu penyumbang emisi CO₂ terbesar. Produksi semen, baja, dan aluminium sangat intensif energi. Strategi mitigasi karbon dalam sektor ini mencakup efisiensi energi, penggunaan energi terbarukan, dan adopsi material rendah karbon atau material daur ulang (Labaran et al., 2022).

2.3 Paving Block : Material Konvensional vs Material Alternatif

Paving block konvensional umumnya terbuat dari campuran semen, pasir, kerikil, dan air. Proses produksi semen adalah sumber emisi CO₂ yang signifikan, baik dari dekomposisi kalsium karbonat maupun dari pembakaran bahan bakar (oksya hikmawan, 2019)(Lu et al., 2009). Penggunaan plastik daur ulang sebagai pengganti agregat atau pengikat dalam paving block telah dieksplorasi sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan komparatif, menggabungkan analisis siklus hidup (Life Cycle Assessment - LCA) parsial untuk membandingkan jejak karbon antara paving block konvensional dan paving block plastik (Ruth Clarissa Tambunan & Julia Saputri, 2024). Data primer dikumpulkan dari

studi kasus proyek percontohan pembuatan paving block plastik, sementara data sekunder diambil dari literatur ilmiah dan basis data lingkungan (Bakhtiar, 2009).

3.1 Asumsi dan Batasan

Fokus pada fase "cradle-to-gate" (dari ekstraksi bahan baku hingga produk jadi di pabrik). Jenis plastik yang dipertimbangkan adalah Polyethylene Terephthalate (PET), High-Density Polyethylene (HDPE), dan Polypropylene (PP), yang merupakan jenis plastik yang paling umum ditemukan dalam limbah padat perkotaan (Hartono & Rachmat, 2022). Paving block standar dengan dimensi 20x10x6 cm sebagai unit fungsional.

3.2 Data Input dan Estimasi Jejak Karbon

Tabel 1: Komposisi Material Paving Block Konvensional (per unit paving block)

Material	Proporsi (%)	Massa (kg/unit)	Emisi CO ₂ ekuivalen (kgCO ₂ /kg material)
Semen Portland	10-15	0.15 - 0.225	0.8 - 0.9 (rata-rata: 0.85)
Pasir	50-60	0.75 - 0.9	0.005
Kerikil	30-40	0.45 - 0.6	0.003
Air	5-10	0.075 - 0.15	0.0001
Total (kira-kira)	100	1.5	
Sumber: Data rerata industri, literatur LCA (misalnya, (Paramita & Putri, 2025); (Rathivarman et al., 2025))			

Tabel 2: Komposisi Material Paving Block Plastik (per unit paving block)

Material	Proporsi (%)	Massa (kg/unit)	Emisi CO ₂ (kg CO ₂ e/kg material)*
Agregat Plastik Daur Ulang	70-80	1.05 - 1.2	0.05 - 0.15 (untuk proses daur ulang)
Bahan Pengikat (misal: aspal/plastik)	20-30	0.3 - 0.45	0.2 - 0.4 (tergantung jenis & proses)
Total (kira-kira)	100	1.5	
*Catatan: Emisi CO ₂ e untuk plastik daur ulang jauh lebih rendah dibandingkan produksi plastik virgin atau semen. Angka ini mencakup pengumpulan, pembersihan, pencacahan, dan peleburan plastik.			

Pendapatan Plastik per Bulan (kg)	Kebutuhan Plastik per Paving Blok (gram)	Perkiraan Jumlah Paving Blok yang Dihasilkan
30	450	66
30	500	60
35	400	87
35	450	77
35	500	70
Sumber: Literatur LCA terkait plastik daur ulang (misalnya; (Jeswani et al., 2021),		

Tabel 3: Emisi CO₂e dari Proses Produksi Paving Block (per unit paving block)

Proses Produksi	Paving Block Konvensional (kg CO ₂ e/unit)	Paving Block Plastik (kg CO ₂ e/unit)	Keterangan
Pencampuran	0.005 - 0.01	0.005 - 0.01	Konsumsi energi mesin
Pencetakan	0.002 - 0.005	0.002 - 0.005	Konsumsi energi mesin
Pengeringan/Curing	0.01 - 0.02 (untuk semen)	0.001 - 0.005 (jika ada pemanasan)	Proses pengeringan (untuk konvensional)
Proses Produksi	Paving Block Konvensional (kg CO ₂ e/unit)	Paving Block Plastik (kg CO ₂ e/unit)	Keterangan atau pendinginan (untuk plastik)
Transportasi	0.005 - 0.01	0.005 - 0.01	Transportasi bahan baku ke pabrik
Total (proses)	0.022 - 0.036	0.013 - 0.021	
Sumber: Estimasi berdasarkan literatur teknik dan industri.			

Total jejak karbon per unit paving block dihitung dengan menjumlahkan emisi dari material dan proses produksi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perbandingan Jejak Karbon

Berdasarkan data yang disajikan, estimasi jejak karbon per unit paving block adalah sebagai berikut:
Tabel 4: Perbandingan Jejak Karbon Paving Block (kgCO₂/unit)

Hasil menunjukkan bahwa produksi paving block plastik berpotensi mengurangi

Jenis Paving Block	Jejak Karbon dari Material (kgCO ₂ /unit)	Jejak Karbon dari Proses Produksi (kg CO ₂ /unit)	Total Jejak Karbon (kg CO ₂ /unit)	Pengurangan Jejak Karbon (%)*
Konvensional	0.12 - 0.20	0.022 - 0.036	0.142 - 0.236	N/A
Plastik	0.08 - 0.19	0.013 - 0.021	0.093 - 0.211	10 - 35%
*Pengurangan dihitung berdasarkan rata-rata nilai jejak karbon.				

Jejak karbon dibandingkan dengan paving block konvensional. Pengurangan ini sebagian besar berasal dari penghindaran emisi yang terkait dengan produksi semen dan penggunaan material daur ulang yang memiliki jejak karbon lebih rendah.

Berikut adalah tabel 4.1 : penunjang data perkiraan jumlah paving blok yang dapat dibuat per bulan di universitas sains indonesia berdasarkan kisaran pendapatan plastik dan kebutuhan plastik per paving blok:

Perhitungan:

Jumlah Paving Blok = (Pendapatan Plastik (kg) x 1000) / Kebutuhan Plastik per Paving Blok (gram)

Contoh: (30 kg x 1000) / 400 gram = 75 paving blok

4.2 Mekanisme Mitigasi Karbon

Pemanfaatan sampah plastik menjadi paving block berkontribusi pada mitigasi karbon melalui beberapa mekanisme:

- 1) Pengurangan Emisi dari Produksi Material Virgin: Mengganti semen dan agregat dengan plastik daur ulang mengurangi emisi CO₂ yang terkait dengan produksi material-material tersebut.
- 2) Sekuestrasi Karbon (Carbon Sequestration) dalam Produk: Meskipun plastik terbuat dari hidrokarbon (yang mengandung karbon), dengan mengubahnya menjadi produk tahan lama seperti paving block, karbon yang terkandung dalam plastik tersebut "terkunci" atau tersekuestrasi dalam produk, mencegahnya untuk terurai dan melepaskan CO₂ ke atmosfer dalam jangka pendek hingga menengah.
- 3) Pengurangan Emisi dari Pengelolaan Limbah: Mengurangi kebutuhan akan insinerasi (pembakaran) sampah plastik, yang menghasilkan emisi CO₂ dan polutan lainnya, atau pembuangan di TPA yang dapat menghasilkan metana (CH₄), gas rumah kaca yang lebih kuat dari CO₂.
- 4) Promosi Ekonomi Sirkular: Mendorong sistem produksi dan konsumsi yang lebih berkelanjutan, mengurangi ekstraksi sumber daya alam, dan meminimalkan limbah, yang secara tidak langsung berkontribusi pada dekarbonisasi ekonomi secara keseluruhan.

Potensi Skala Implementasi dan Dampak Lingkungan

Jika diasumsikan volume produksi paving block di suatu kota mencapai X juta unit per tahun, dan Y% dapat disubstitusi dengan paving block plastik, maka potensi mitigasi karbon dapat dihitung.

Tabel 5: Estimasi Potensi Mitigasi Karbon per Kota (Asumsi)

Parameter	Nilai Asumsi	Unit	Keterangan
Produksi Paving Block Konvensional/tahun	100	Juta unit	Estimasi kebutuhan paving block di kota besar
Proporsi Substitusi dengan Plastik	20	%	Target awal yang realistis
Massa Plastik/unit Paving Block	1.1	kg/unit	Rata-rata massa plastik dalam 1 unit paving block
Pengurangan Jejak Karbon/unit	0.05	kg CO ₂ e/unit	Rata-rata pengurangan jejak karbon dari Tabel 4
Total Plastik Terdiversi/tahun	22	Ribu ton	(100 Juta unit * 20% * 1.1 kg/unit)
Total Mitigasi Karbon/tahun	1.0	Ribu ton CO ₂	(100 Juta unit * 20% * 0.05 kg CO ₂ /unit)
Catatan: Angka-angka ini adalah estimasi dan sangat bergantung pada kondisi spesifik dan teknologi yang digunakan.			

Potensi mitigasi karbon ini menunjukkan bahwa pemanfaatan sampah plastik menjadi paving block dapat memberikan kontribusi yang berarti dalam upaya pengurangan emisi GHG pada skala regional.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pemanfaatan sampah plastik menjadi paving block adalah strategi mitigasi karbon yang menjanjikan, menawarkan pendekatan ekonomi sirkular untuk mengatasi dua krisis lingkungan utama: perubahan iklim dan polusi plastik. Melalui analisis jejak karbon, ditemukan bahwa paving block plastik memiliki emisi CO₂e yang lebih rendah dibandingkan paving block konvensional. Mekanisme mitigasi karbon meliputi pengurangan emisi dari material virgin, sekuestrasi karbon dalam produk, dan pengurangan emisi dari pengelolaan limbah.

5.2 Saran

- 1) Investasi dalam R&D: Lanjutkan penelitian untuk mengoptimalkan formulasi, proses produksi, dan daya tahan paving block plastik.
- 2) Pengembangan Kebijakan: Pemerintah perlu mengembangkan kebijakan insentif, standar kualitas, dan kerangka regulasi yang mendukung produksi dan penggunaan material daur ulang dalam konstruksi.
- 3) Penguatan Infrastruktur Daur Ulang: Tingkatkan sistem pengumpulan, pemilahan, dan pengolahan sampah plastik untuk memastikan pasokan bahan baku yang konsisten dan berkualitas.

- 4) Edukasi dan Kesadaran Publik: Kampanyekan manfaat lingkungan dan ekonomi dari paving block plastik untuk mendorong adopsi oleh masyarakat dan industri.
- 5) Studi LCA Komprehensif: Lakukan analisis siklus hidup penuh (cradle-to-grave) untuk mendapatkan gambaran lengkap tentang dampak lingkungan produk ini. Dengan implementasi yang tepat, paving block plastik dapat menjadi komponen kunci dalam transisi menuju ekonomi rendah karbon dan nol sampah, mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bakhtiar, A. (2009). Studi peningkatan mutu paving-block dengan penambahan abu sekam padi. *Jurnal Portal*, 1(No.2), 73–80.
- Fauziah, Z., & Bait, M. (2020). Optimalisasi Lahan Pekarangan Sebagai Upaya Pemenuhan Kebutuhan Pangan Keluarga. *Al-Umron: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(1), 28–34. <https://ejournal.sunan-giri.ac.id/index.php/AL-UMRON/article/download/257/223>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). “Production , use , and fate of all plastics ever made” CA 93106; Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara, USA. *Science Advances*, 3(July), 25–29.
- Hartono, E. F., & Rachmat, N. (2022). Klasifikasi Jenis Plastik HDPE, LDPE, dan PS Berdasarkan Tekstur Menggunakan Metode Support Vector Machine. *JATISI (Jurnal Teknik Informatika Dan Sistem Informasi)*, 9(2), 1403–1412. <https://doi.org/10.35957/jatisi.v9i2.2470>
- Jeswani, H., Krüger, C., Russ, M., Horlacher, M., Antony, F., Hann, S., & Azapagic, A. (2021). Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. *Science of the Total Environment*, 769. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>
- Labaran, Y. H., Mathur, V. S., Muhammad, S. U., & Musa, A. A. (2022). Carbon footprint management: A review of construction industry. *Cleaner Engineering and Technology*, 9(May), 100531. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100531>
- Le, V. Van, Esterhuizen, M., Tran, Q. G., Yun, J. H., Jung, M. Y., & Lee, S. A. (2025). Harnessing microalgae to mitigate the environmental impact of the cement industry: Emission reduction and bio-cement production. *Carbon Capture Science and Technology*, 16(April), 100448. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100448>
- Lu, H., Masanet, E., Price, L., & Berkeley, L. (2009). Evaluation of Life-Cycle Assessment Studies of Chinese Cement Production : Challenges and Opportunities The Development of Life Cycle Assessment in China. *Energy*, 1–13. <http://www.iscp.org.cn/clcm2008en/default.aspx>.
- oksya hikmawan. (2019). Pengaruh variasi waktu dan tekanan terhadap kehilangan minyak pada air kondensat di unit sterilizer pabrik kelapa sawit. *Jurnal Teknik Dan Teknologi*, 14(28), 33–39. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=id&user=jN60_IUAAAAJ&citation_for_view=jN60_IUAAAAJ:qjMakFHDy7sC
- Paramita, A. H., & Putri, C. A. (2025). Penambahan Limbah Plastik Jenis Polyethylene.
- Pihkola, H., Hylkilä, E., Paronen, E., Markkula, A., & Liirus, H. (2025). Social-LCA providing new insights and learnings for social responsibility—case pulp and paper industry. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 30(6), 1435–1450. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02374-y>
- Rathivarman, N., Yutharshan, S., Kabishangar, A., Janani, V., Gowthaman, S., Nawarathna, T. H. K., Chen, M., & Kawasaki, S. (2025). Evaluating the performance and durability of concrete paving blocks enhanced by bio-cement posttreatment. *Biogeotechnics*, 3(1), 100103.

<https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100103>

- Ruth Clarissa Tambunan, & Julia Saputri. (2024). Pemanfaatan Sampah Plastik sebagai Material Paving Block. *Dinamika Sosial : Jurnal Pengabdian Masyarakat Dan Transformasi Kesejahteraan*, 1(4), 01–09. <https://doi.org/10.62951/dinsos.v1i4.606>
- Sun, L. M., McIntyre, S. R., Iacomi, P., Everden, K., Williams, P. T., Zong, S., Liu, X., Zhu, X., Yang, Y., Li, S., Wu, G., Huang, F., Liu, L., Yuan, X., Zhang, H., Zhang, J., Yang, H., Chen, W., Sun, H., ... Wu, C. (2025). Biochar production, activation, and applications: A comprehensive technical review. *Carbon Capture Science and Technology*, 16(April). <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100421>
- Wang, S., Xie, M., Wang, S., & Zhuo, Y. (2025). Carbon Capture Science & Technology Kinetic model describing the effect of amine loading and temperature on CO₂ capture by solid amine adsorbent. *Carbon Capture Science & Technology*, 17(June), 100491. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2025.100491>
- ar, M., & Irdam. (2019). Perancangan Mesin Penggulung Kumparan Motor Listrik Sistem Otomatis Berbasis Mikrokontroler. *Jurnal Keteknikan Dan Sains*, 2(1), 8–13.
- Ammar, M., Hashim, A., Aiman, M., Fauzi, M., Firdaus, M., Zin, M., Siti, K., Ku, S., & Noh, M. (2023). Iot-Based Home Automation System Using Arduino Uno. *Journal of Academia*, 11(1), 26–33.
- Bai-Di, S., Yong-Feng, J., Jing-Yu, S., Ye-Feng, B., Bing-Yan, C., & Ke, Y. (2024). Optimization of Transformer Windings Based on FEA-XGBoost and NSGA-III Algorithm. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/5514678>
- Chandu, H. S. (2024). *A Review Of Iot-Based Home Security Solutions : Focusing On Arduino Applications*. 11(10), 391–396.
- Eko, S., Sri, W., & Ahmad, Y. (2020). *REKAYASA PINTU GESER OTOMATIS DENGAN MENGGUNAKAN SENSOR PASSIVE INFRA RED (PIR)* Eko. 10(1), 47–61.
- García-Tudela, P. A., & Marín-Marín, J. A. (2023). Use of Arduino in Primary Education: A Systematic Review. *Education Sciences*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/educsci13020134>
- Isizoh, A. N., E, U. S. U. A. E., Ugwuanyi, C. J., & Abonyi, D. C. (2021). *International Journal of Research Publication and Reviews Analysis of Microcontroller / LCD Interface for Embedded Systems*. 2, 1003–1009.
- Kumar, V., Sharma, K. V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayake, U. (2024). A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. *Smart Agricultural Technology*, 8(May), 100487. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100487>
- Luqman, M., Anggraheny, B., Herwandi, H., & Murtono, A. (2025). Aplikasi dan unjuk kerja motor driver L-298 dan BTS7960 sebagai power switching pada inverter. *Jurnal Eltek*, 23(1), 9–15. <https://doi.org/10.33795/eltek.v23i1.6656>
- Ngong, S. M., Guy-de-patience, F. M., & Stephane, N. N. (2025). A comparative study of power transformers windings diagnostic techniques: Part I. *Discover Electronics*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44291-025-00052-3>
- Putra, D. A., & Golwa, G. V. (2021). Rancang Bangun Prototype Mesin Sortir Berdasarkan Barcode Id Pada Produk Di Area Produksi. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(3), 173–182.
- Rahmat. (2024). Rancang bangun mesin stirling tipe gamma menggunakan metode vdi 2221. *Ekselesta, Jurnal*, 1(1), 1–9.
- Rahmat, R., Putrira, D. A., Restu, R. N., & Imron, J. (2025). 3D Model Autocad Of The Piston Displacer Cup For A Gamma Stirling Engine Using The API Method. *ELKOM Journal*, 18(1), 86–93.
- Rathivarman, N., Yutharshan, S., Kabishangar, A., Janani, V., Gowthaman, S., Nawarathna, T. H. K., Chen, M., & Kawasaki, S. (2025). Evaluating the performance and durability of concrete paving blocks enhanced by bio-cement posttreatment. *Biogeotechnics*, 3(1), 100103. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100103>

- Retno Devita, Nanda Tommy Wirawan, & David Agustri Syafni. (2022). Perancangan Prototipe Keamanan Pintu Rumah Menggunakan Kamera Ttl Dan Aplikasi Telegram Berbasis Arduino. *Jurnal Ilmiah Sistem Informasi Dan Ilmu Komputer*, 2(2), 49–61. <https://doi.org/10.55606/juisik.v2i2.199>
- Rifai, B., Rosano, A., & Aji, S. (2019). *Implementasi Arduino Uno dan ATmega328P Untuk Perancangan Alat Keamanan Sepeda Motor*. 2, 144–148.
- Syed, N. H., Khan, N. A., Ahmad, N., Khan, M., Ahmad, F., Humayun, F., Haq, S., Alsayer, I. A., & Altuwair, I. A. (2024). A CFD Analysis to Investigate the Effect of Inserts on the Overall Heat Transfer Coefficient in a Concentric Tube Heat Exchanger. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(6), 18077–18085. <https://doi.org/10.48084/etasr.8891>
- Wangde, Q., Zhao, X., Tyrrell, A., Perinpanayagam, S., Niu, S., Wen, G., & Abstract—Electric. (2021). Application of Artificial Intelligence-Based Technique in Electric Motors: A Review. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 167–186.