

Lontara Piezoelectric Paving Block as an Eco-Innovation Project in STEAM-PjBL Green Chemistry Learning: A Systematic Literature Review on Science Literacy and Environmental Awareness

A. Muthmainnah*¹, Eda Lolo Allo², Dewiyanti Fadly³

^{1,2,3}Progam Magister Pendidikan Kimia, Universitas Negeri Makassar, Indonesia

Email: andimuthmainnah41@gmail.com*; eda.lolo.allo@unm.ac.id²; dewiyanti.fadly@unm.ac.id³

Abstract


The low science literacy of Indonesian students and the lack of environmental awareness remain urgent challenges in 21st-century science education. Indonesia consistently ranks among the lowest in PISA and TIMSS assessments, while environmental degradation from plastic waste and used engine oil continues to escalate. This systematic literature review aims to identify the scientific foundation and potential of developing a Green Chemistry-based STEAM Eco-Innovation Module through Project-Based Learning (PjBL) as an innovative learning framework capable of simultaneously enhancing students' science literacy and environmental awareness at the senior secondary (SMA/SMK) level. The review was conducted through a systematic review of recent peer-reviewed literature, supplemented by additional sources focusing on engineering aspects. Four major findings emerged: (1) the STEAM-PjBL approach is empirically proven to significantly improve science literacy and 21st-century skills; (2) the integration of green chemistry principles into learning modules effectively cultivates environmental awareness; (3) the utilization of PET/HDPE plastic waste, wood sawdust, and used engine oil as paving block raw materials has been experimentally validated, including B3 hazardous waste encapsulation engineering and controlled thermal melting processes; and (4) road-based piezoelectric technology can successfully convert pedestrian kinetic energy into clean electrical energy. The Lontara Piezoelectric Paving Block innovation integrates the local Bugis-Makassar cultural identity (Lontara script) with cutting-edge green eco-innovation technology.

Article History:

Received 18 April 2026;
Accepted 24 April 2026;
Published 30 April 2026.

Keywords:

Environmental Awareness;
Green Chemistry;
STEAM-PjBL;
Science Literacy;
Piezoelectric Paving Block.

© 2026 The Authors. This open access article is distributed under a (CC-BY License) 

How to Cite:

Muthmainnah, A., Allo, E. L., & Fadly, D. (2026). *Lontara Piezoelectric Paving Block as an Eco-Innovation Project in STEAM-PjBL Green Chemistry Learning: A Systematic Literature Review on Science Literacy and Environmental Awareness*. SEARCH: Science Education Research Journal, 4(2), 69–83. <https://doi.org/10.47945/search.v4i2.2817>

PENDAHULUAN

Pendidikan sains abad ke-21 menghadapi dua tantangan mendesak yang saling berkaitan, yaitu rendahnya literasi sains peserta didik dan memburuknya kondisi lingkungan hidup secara global. Data PISA 2022 menempatkan Indonesia pada peringkat ke-68 dari 81 negara dengan skor sains sebesar 383, yang jauh di bawah rata-rata OECD sebesar 485 dan mencerminkan defisit sistemik dalam penalaran serta penerapan ilmu pengetahuan (OECD, 2023). Temuan serupa dilaporkan oleh TIMSS 2019, di mana peserta didik Indonesia hanya memperoleh skor 396 dalam sains, tertinggal 93 poin dari rata-rata internasional (Mullis et al., 2020). Pada dimensi lingkungan, Indonesia menghasilkan sekitar 7,2 juta ton sampah plastik per tahun dengan tingkat pengelolaan yang layak hanya mencapai 10 hingga 15 persen, sementara oli bekas yang dikategorikan sebagai limbah Bahan Berbahaya dan

Beracun (B3) masih menjadi salah satu aliran limbah yang paling minim penanganannya di tanah air (KLHK, 2023). Realitas ini mengindikasikan bahwa sistem pendidikan sains belum mampu melahirkan generasi yang melek sains sekaligus peduli terhadap keberlanjutan lingkungan.

Literasi sains, sebagaimana didefinisikan oleh kerangka OECD PISA, merupakan kapasitas individu untuk terlibat dengan isu-isu berbasis sains dan menggunakan pengetahuan ilmiah guna membuat keputusan yang beralasan tentang dunia alamiah (OECD, 2019). Kompetensi ini bersifat fundamental bagi kewarganegaraan yang berkelanjutan dan bertanggung jawab. Pada ranah pedagogis kimia, pendekatan *Green Chemistry* atau Kimia Hijau yang dipelopori oleh Anastas dan Warner (1998) menawarkan paradigma transformatif dalam merancang produk dan proses kimia yang meminimalkan penggunaan serta pembentukan zat berbahaya. Integrasi prinsip kimia hijau ke dalam pembelajaran sains terbukti secara signifikan meningkatkan pemahaman konseptual, motivasi belajar, dan kepekaan ekologis peserta didik (Aliah et al., 2024; Rahmadhani et al., 2025).

Pendekatan STEAM (*Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics*), ketika diintegrasikan dengan model *Project-Based Learning* (PjBL), menyediakan struktur pedagogis autentik yang memungkinkan peserta didik untuk menginvestigasi masalah nyata, merancang solusi inovatif, dan menghasilkan produk bermakna secara kontekstual. Bukti empiris secara konsisten menunjukkan bahwa intervensi STEAM-PjBL menghasilkan peningkatan signifikan pada literasi sains dan keterampilan berpikir tingkat tinggi di berbagai jenjang pendidikan (Suryanti et al., 2024; Chistyakov et al., 2023). Dalam konteks Indonesia, Kurikulum Merdeka (2022) secara eksplisit mengakomodasi pendekatan integratif ini dan membuka ruang luas bagi pengembangan pengalaman belajar yang kontekstual, berbasis proyek, serta berorientasi pada penyelesaian masalah nyata. Djam'an (2025) mempertegas bahwa model STEAM untuk program keberlanjutan lingkungan selaras dengan prioritas Asta Cita dan agenda *Education for Sustainable Development* (ESD) nasional.

Dibalik lanskap yang menjanjikan ini, terdapat celah kritis yang belum terjawab dalam literatur pendidikan sains Indonesia. Hingga saat ini belum tersedia modul STEAM-PjBL yang secara bersamaan mengintegrasikan prinsip kimia hijau sebagai muatan inti, menangani masalah lingkungan lokal yang konkret seperti limbah plastik dan B3, menggabungkan teknologi energi terbarukan berbasis piezoelektrik, serta menanamkan identitas budaya lokal sebagai dimensi artistik. Teknologi piezoelektrik yang mengonversi energi mekanik dari tekanan langkah kaki menjadi energi listrik bersih dengan output mencapai sekitar 10 V dan 5,8 mW (Sezer & Koç, 2021; Li et al., 2022), menawarkan komponen inovasi teknologi yang autentik dan relevan secara pedagogis. Atas dasar kesenjangan tersebut, penelitian ini menggagas konsep inovatif *Lontara Piezoelectric Paving Block* sebagai proyek *eco-innovation* berbasis STEAM-PjBL yang menjembatani keempat dimensi tersebut. Penamaan Lontara merujuk pada aksara ikonik Bugis-Makassar dari Sulawesi Selatan dan merepresentasikan dimensi *Arts*, sekaligus mewujudkan prinsip *Ethno-STEAM* sebagai inovasi teknologi yang berakar pada identitas budaya. Melalui proyek ini, peserta didik mengonversi limbah plastik PET/HDPE, oli bekas, dan serbuk kayu menjadi

paving block berstandar SNI yang dilengkapi sensor piezoelektrik penghasil listrik. Pengalaman belajar yang autentik, kaya muatan teknologi, dan berpijak pada budaya lokal seperti ini diperkirakan mampu secara simultan meningkatkan literasi sains dan menumbuhkan kepedulian lingkungan peserta didik secara nyata dan berkelanjutan.

Guna memperkuat gagasan inovasi ini secara konseptual dan ilmiah, artikel ini menyajikan kajian literatur sistematis yang bertujuan untuk menelaah empat aspek utama. Pertama, bukti empiris efektivitas STEAM-PjBL dalam meningkatkan literasi sains dan kepedulian lingkungan peserta didik. Kedua, dasar teoritis dan praktis integrasi prinsip kimia hijau dalam modul pembelajaran sains. Ketiga, kelayakan teknis *eco-paving block* berbahan dasar limbah, mencakup aspek rekayasa kritis yang meliputi enkapsulasi B3, pengolahan termal terkontrol, desain material komposit, serta ketahanan licin permukaan. Keempat, potensi pemanenan energi piezoelektrik sebagai komponen pembelajaran teknologi yang kontekstual dan futuristik. Melalui sintesis temuan dari literatur ilmiah internasional dan nasional bereputasi, kajian ini membangun kerangka konseptual yang kokoh dan komprehensif sebagai landasan pengembangan modul STEAM-PjBL Lontara Piezoelectric Paving Block pada tahap penelitian berikutnya.

METODE PENELITIAN

Bagian metode ini menjelaskan secara sistematis proses kajian literatur (*Systematic Literature Review*) sebagai fondasi utama dalam penyusunan artikel ini. Pendekatan ini diformulasikan untuk menjamin objektivitas, reproduktifitas, dan kedalaman analitis dari sintesis data yang disajikan. Pemilihan objek kajian dipusatkan pada korpus literatur akademik yang membahas persilangan antara inovasi pendidikan sains, manajemen limbah polimer, rekayasa komposit material, dan pemanenan energi piezoelektrik. Kasus-kasus yang ditinjau mencakup intervensi pembelajaran menggunakan model PjBL atau pendekatan STEAM di berbagai jenjang pendidikan, eksperimen kekuatan mekanik *paving block* berbahan limbah organik maupun anorganik, serta pemodelan transduser untuk jalan raya. Tempat observasi virtual untuk akuisisi data adalah basis data akademik berskala global yang memegang otoritas tinggi dalam validasi *peer-review*, secara khusus pangkalan data Scopus (untuk artikel ber-Impact Factor dan bereputasi kuartil Q1-Q2) serta pangkalan data *Science and Technology Index* (SINTA) untuk mengkontekstualisasikan relevansi kebijakan kurikulum dan parameter material di wilayah domestik Indonesia.

Tipe penelitian ini diklasifikasikan sebagai *Systematic Literature Review* dengan pendekatan sintesis kualitatif eksplanatori. Jenis data yang diolah secara eksklusif merupakan data sekunder primer, yang mengacu pada data metrik, koefisien, nilai statistik, dan temuan naratif yang sebelumnya telah dipublikasikan oleh para peneliti orisinal. Partisipan dalam penelitian ini, atau lebih tepatnya sumber informasi, direpresentasikan oleh himpunan 30 artikel ilmiah utama yang diseleksi secara ketat dari rentang tahun terbit 2021 hingga 2025. Koleksi literatur ini mendemonstrasikan keseimbangan representasi antara 10 artikel internasional yang berfokus pada kerangka makro pendidikan STEAM dan teknologi mutakhir piezoelektrik, 10 artikel SINTA yang membahas implementasi lokal *eco-paving block* dan literasi sains dalam Kurikulum Merdeka, serta tambahan 10 referensi

spesifik untuk memvalidasi keempat pilar rekayasa material (enkapsulasi, termal, komposit, dan uji gesek permukaan).

Proses penelitian dan teknik pengumpulan data diorkestrasikan melalui empat fase sistematis yang merujuk pada protokol tinjauan literatur standar. Tahap pertama, Identifikasi, melibatkan formulasi untaian pencarian Boolean yang spesifik. Kata kunci yang diaplikasikan meliputi ("STEAM" OR "STEM") AND ("Project-Based Learning" OR "PjBL") and "Science Literacy", serta ("Green Chemistry" OR "Eco-Innovation") AND ("Piezoelectric Harvester" OR "Plastic Waste Paving Block"). Tahap kedua, Penyaringan (*Screening*), merupakan proses eliminasi awal di mana artikel yang duplikat, diterbitkan sebelum tahun 2021 (kecuali beberapa referensi klasik yang sangat krusial), dan artikel tanpa akses teks penuh (*open access*) dieliminasi dari daftar koleksi. Tahap ketiga, Uji Kelayakan (*Eligibility*), dilakukan dengan membaca abstrak dan metodologi dari setiap artikel yang tersisa untuk memastikan bahwa artikel tersebut secara langsung menyumbangkan data yang relevan dengan variabel dependen (literasi sains dan lingkungan) atau variabel independen (rekayasa material). Tahap keempat adalah Inklusi, di mana 30 artikel final dipilih sebagai inti dari kajian ini.

Teknik analisis data mengadopsi model alir interaktif yang mencakup reduksi data, penyajian data terstruktur, dan penarikan kesimpulan kausalitas. Pada tahap pemrosesan data, informasi yang diekstraksi dari setiap literatur direduksi dan diklasifikasikan ke dalam matriks parameter, yang mencakup metodologi penelitian asli, ukuran sampel, rentang suhu operasional peleburan polimer, kapasitas beban kuat tekan (dalam MegaPascal), dan tegangan luaran piezoelektrik (dalam miliWatt). Analisis data dilakukan dengan menyilangkan (*cross-reference*) temuan dari ranah sains material dengan prinsip keselamatan pendidikan. Sebagai contoh, kurva analisis Termogravimetri (TGA) dari artikel rekayasa dianalisis untuk menjustifikasi apakah prosedur pencampuran plastik dapat dilakukan secara aman oleh peserta didik sekolah menengah tanpa memicu toksikologi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian Hasil dan Pembahasan ini diartikulasikan untuk menunjukkan secara presisi temuan-temuan dari kajian literatur, membangun interpretasi lintas disiplin, serta memberikan eksplanasi mendalam mengenai implikasi dari penggabungan rekayasa teknik industri dengan pedagogi sekolah menengah. Fokus utamanya adalah menjawab hipotesis yang diajukan dalam Pendahuluan, mengelaborasi mekanisme pendukung dari hasil literatur, dan mensintesis kesesuaian jawaban tersebut dengan korpus keilmuan yang telah ada. Berikut susunan sistematis yang mendeskripsikan, mengeksplanasi, dan merelasikan data:

1. Deskripsi Data Literatur

Data yang diakuisisi dari proses Systematic Literature Review dipetakan secara terstruktur untuk menunjukkan divergensi fokus kajian namun berkonvergensi pada satu tujuan inovasi yang sama. Literatur dikategorisasikan berdasarkan basis data indeksasi untuk membedakan antara tren riset global yang mutakhir dengan riset aplikatif berskala nasional.

Tabel 1. Ringkasan Artikel Kajian Literatur dan Kontribusinya terhadap Penelitian

No.	Penulis (Tahun)	Topik Kajian	Kontribusi terhadap Penelitian
1	Suryanti et al. (2024) <i>Scopus Q2</i>	STEAM-PjBL dan Literasi Sains Sekolah Dasar	Membuktikan secara empiris bahwa STEAM-PjBL meningkatkan literasi sains secara signifikan dibanding metode konvensional.
2	Chistyakov et al. (2023) <i>Scopus Q2</i>	Efektivitas PjBL dalam Pendidikan STEAM	Mengidentifikasi PjBL meningkatkan berpikir kritis, kreativitas, dan motivasi intrinsik lintas jenjang pendidikan.
3	Domenici (2022) <i>Scopus Q2</i>	STEAM-PjBL Berbasis Kimia untuk Calon Guru	Membuktikan kegiatan hands-on STEAM efektif membangun pemahaman konsep kimia hijau secara autentik.
4	Li et al. (2022) <i>Scopus Q1</i>	Teknologi Piezoelektrik: Material, Struktur, dan Aplikasi	Menyediakan landasan teknis teknologi piezoelektrik dengan output tegangan sekitar 10 V dan kapasitas 0,8 kWh/hari.
5	Sezer & Koc (2021) <i>Scopus Q1</i>	Pemanenan Energi Piezoelektrik: Tinjauan Komprehensif	Menegaskan piezoelektrik berbasis jalan sebagai sumber energi bersih yang menjanjikan untuk infrastruktur cerdas.
6	Abid et al. (2021) <i>Scopus Q1</i>	Material Piezoelektrik untuk Aplikasi Industri	Memberikan analisis tekno-ekonomi pemanenan energi dari lalu lintas kendaraan sebagai justifikasi keberlanjutan.
7	Djam'an (2025) <i>Scopus</i>	Pendidikan Lingkungan dalam Pendekatan STEAM	Membuktikan model STEAM untuk keberlanjutan lingkungan selaras dengan Kurikulum Merdeka dan Asta Cita Indonesia.
8	Baran & Maskan (2021) <i>Scopus</i>	PjBL-STEM dan Keterampilan Abad Ke-21	Membuktikan intervensi PjBL-STEM meningkatkan kepekaan lingkungan peserta didik secara signifikan.
9	Aguilera-Morales et al. (2024) <i>Scopus Q2</i>	PjBL untuk Kesadaran Lingkungan Sekolah Menengah	PjBL berbasis masalah nyata meningkatkan kesadaran lingkungan siswa lebih signifikan dibanding pendekatan konvensional.
10	Zhao et al. (2025) <i>Scopus Q1</i>	Piezoelektrik untuk Pemanenan Energi Perkerasan Jalan	Memperbarui data teknis terkini dengan output terbaik 5,8 mW pada 15 Hz sebagai referensi desain Lontara Paving Block.
11	Kartini & Aljamaliah (2023) <i>SINTA 2</i>	PjBL, Literasi Sains, dan Kepedulian Lingkungan SD	Menegaskan PjBL efektif menumbuhkan karakter peduli lingkungan melalui pengalaman belajar kontekstual.
12	Dewantari et al. (2021) <i>SINTA 2</i>	Pengembangan Perangkat STEAM-PjBL (ADDIE)	Memberikan referensi metodologi R&D dengan validasi sangat baik dari ahli materi, media, dan desain.
13	Suprihatien et al. (2025) <i>SINTA 2</i>	Modul Ajar PjBL-STEAM dan Keterampilan Proses Sains	Menyediakan prototipe pengembangan modul berbasis STEAM-PjBL yang valid, praktis, dan efektif.

No.	Penulis (Tahun)	Topik Kajian	Kontribusi terhadap Penelitian
14	Aliah et al. (2024) SINTA 2	Inovasi Pembelajaran Kimia melalui Kimia Hijau	Membuktikan kimia hijau meningkatkan motivasi dan kepedulian lingkungan siswa dalam pembelajaran kimia.
15	Rahmadhani et al. (2025) SINTA 3	Revitalisasi Kimia Hijau dan Literasi Ekologis	Melaporkan pembelajaran berbasis kimia hijau meningkatkan literasi sains ekologis peserta didik hingga 40%.
16	Dikdastika (2025) SINTA 2	Integrasi PjBL dan Literasi Sains dalam Kurikulum Merdeka	Memperkuat justifikasi penggunaan PjBL dalam Kurikulum Merdeka untuk meningkatkan pemahaman dan keterampilan IPA.
17	Putra et al. (2025) SINTA 2	STEM-PjBL dan Literasi Lingkungan Siswa	Mengukur peningkatan tiga komponen literasi lingkungan melalui model PjBL secara signifikan.
18	Hasaya et al. (2021) SINTA 3	Potensi Limbah Plastik sebagai Bahan Baku Eco-Paving Block	Membuktikan PET dan HDPE layak dimanfaatkan sebagai bahan baku eco-paving block bernilai ekonomis.
19	Sudarno et al. (2021) SINTA 3	Paving Block dari Limbah Plastik PET: Kuat Tekan dan Biaya	Membuktikan campuran 50:50 PET-agregat menghasilkan kuat tekan 50,97 MPa sesuai SNI Mutu A.
20	Kahfi et al. (2025) SINTA 3	Paving Block dari Plastik PET dan Oli Bekas	Memvalidasi kombinasi PET, pasir, dan oli bekas sebagai paving block layak pakai dengan kinerja mekanik optimal.

2. Eksplanasi Data: Mekanisme dan Sintesis Teoretis

Eksplanasi data bertujuan mengupas fondasi ontologis dan epistemologis dari inovasi desain modul. Integrasi kajian literatur ini mengelompokkan analisis ke dalam domain pedagogis dan rekayasa sains yang terjalin erat.

a. Efektivitas Pendekatan STEAM-PjBL dalam Meningkatkan Literasi Sains dan Keterampilan Abad ke-21

Temuan pertama dari kajian literatur ini adalah bukti empiris yang kuat tentang efektivitas pendekatan STEAM-PjBL dalam meningkatkan literasi sains peserta didik. Suryanti et al. (2024) dalam quasi-eksperimen dengan 48 peserta didik membuktikan bahwa model STEAM-PjBL secara signifikan meningkatkan skor literasi sains dibandingkan metode konvensional. Temuan ini diperkuat oleh Chistyakov et al. (2023) yang melalui *systematic review* terhadap 36 artikel Scopus dan WoS mengidentifikasi bahwa PjBL dalam pendidikan STEAM meningkatkan berpikir kritis, kreativitas, dan motivasi intrinsik lintas jenjang. Domenici (2022) menambahkan bahwa aktivitas STEAM-PjBL berbasis kimia yang bersifat *hands-on* sangat efektif untuk membangun pemahaman konsep kimia hijau secara autentik.

Pada konteks Indonesia, Suprihatien et al. (2025) telah mengembangkan modul ajar PjBL-STEAM yang valid, praktis, dan efektif meningkatkan keterampilan proses sains. Dewantari et al. (2021) menggunakan model ADDIE dalam pengembangan perangkat STEAM-PjBL dan mendapatkan hasil validasi sangat baik dari ahli materi, media, dan

desain. Kajian Dikdastika (2025) memperkuat bahwa integrasi PjBL dalam Kurikulum Merdeka efektif meningkatkan pemahaman IPA dan keterampilan proses sains melalui *e-modul* berbasis PjBL.

Baran & Maskan (2021) membuktikan melalui uji Wilcoxon bahwa intervensi PjBL-STEM meningkatkan kepekaan lingkungan (*environmental sensitivity*) secara signifikan sebagai bagian dari keterampilan abad ke-21. Aguilera-Morales et al. (2024) menemukan bahwa PjBL dalam pendidikan lingkungan meningkatkan kesadaran lingkungan siswa secara signifikan ketika siswa dihadapkan pada masalah nyata di sekitar mereka. Temuan-temuan ini secara kolektif memberikan landasan empiris yang kuat untuk pengembangan modul STEAM Eco-Innovation berbasis PjBL yang menjadi inti gagasan inovasi penelitian ini.

b. Kimia Hijau sebagai Muatan Inti Modul STEAM Eco-Innovation

Kimia hijau (*green chemistry*) merupakan pendekatan ilmiah yang bertujuan merancang proses dan produk kimia yang meminimalkan penggunaan dan pembentukan zat berbahaya. Aliah et al. (2024) melalui *narrative literature review* sepuluh tahun terakhir menemukan bahwa integrasi *green chemistry* dalam pembelajaran kimia memberikan dampak besar terhadap peningkatan pengalaman belajar, motivasi, dan kepedulian lingkungan siswa. Penggunaan bahan alami terbarukan di laboratorium sebagai pengganti bahan kimia sintetik merupakan wujud nyata prinsip kimia hijau yang dapat dioperasionalkan di kelas.

Rahmadhani et al. (2025) mengusulkan kerangka revitalisasi pembelajaran kimia berbasis *green chemistry* melalui kurikulum integratif, PjBL berbasis masalah lingkungan, *green lab school*, dan evaluasi holistik. Kajian tersebut melaporkan bahwa pembelajaran STEM-ESD berbasis kimia hijau meningkatkan kompetensi literasi sains ekologis peserta didik hingga 40%. Djam'an (2025) dalam konteks Indonesia secara spesifik menyatakan bahwa model STEAM untuk program keberlanjutan lingkungan sejalan dengan Kurikulum Merdeka dan prioritas Asta Cita, yakni integrasi ESD (*Education for Sustainable Development*), STEAM, dan pendidikan lingkungan. Dalam konteks proyek Lontara Paving Block, prinsip kimia hijau tercermin dalam pemanfaatan limbah plastik, oli bekas, dan serbuk kayu sebagai bahan baku, menggantikan material baru yang berpotensi merusak lingkungan, sebagai aplikasi dari prinsip pencegahan limbah dan penggunaan bahan daur ulang.

c. Validasi Teknis Lontara Paving Block: Bahan Baku, Rekayasa, dan Aspek Keamanan

Komponen utama Lontara Paving Block terdiri dari limbah plastik, oli bekas, serbuk kayu, pasir, dan semen. Hasaya et al. (2021) mengkaji potensi sampah plastik jenis PET dan HDPE sebagai bahan baku *eco-paving block* dan menemukan bahwa pemanfaatan ulang limbah plastik menurunkan volume sampah sekaligus menghasilkan produk konstruksi bernilai ekonomis. Sudarno et al. (2021) secara eksperimental membuktikan bahwa campuran 50:50 plastik PET-agregat menghasilkan kuat tekan 50,97 MPa (Mutu A sesuai SNI), lebih unggul dari paving block konvensional dengan biaya produksi lebih rendah Rp 139.031/m². Kahfi et al. (2025) melaporkan bahwa kombinasi limbah plastik PET, pasir, dan oli bekas sebagai pengikat alternatif menghasilkan paving block yang layak pakai. Terdapat

empat aspek rekayasa kritis yang memperkuat orisinalitas dan kedalaman ilmiah gagasan penelitian ini.

Pertama, rekayasa enkapsulasi B3, oli bekas dikategorikan sebagai limbah B3 karena mengandung logam berat dan hidrokarbon aromatik. Hao et al. (2025) dan Royani et al. (2025) memvalidasi bahwa plastik dapat berfungsi sebagai matriks enkapsulasi yang mengurung molekul oli bekas melalui ikatan fisik dan kompatibilitas polimer-minyak saat mengeras, sehingga mencegah rembesan ke lingkungan. Kedua, rekayasa termal terkontrol, Krishnamurthy et al. (2025) membuktikan teknologi zero-emission bahwa LDPE harus dilelehkan pada rentang suhu 125–250°C (bukan dibakar) dalam sistem tertutup untuk menghasilkan paver block tanpa emisi gas berbahaya. Desyani et al. (2023) menegaskan prosedur teknis pelelehan terkontrol ini.

Ketiga, rekayasa material komposit serbuk kayu-plastik, Gutierrez-Orellana et al. (2024) mengembangkan WPC (*Wood Plastic Composite*) berbasis rHDPE dan serbuk kayu dengan rasio 34:60 yang memenuhi standar industri, sementara Saputra et al. (2024) menentukan persentase optimal serbuk kayu dalam paving block berstandar SNI 03-0691-1996. Keempat, uji licin permukaan (*CSLP*), Smith & Hein (2023) menetapkan nilai minimum SCOF 0,5–0,6 untuk keamanan pengguna, sedangkan Sani et al. (2024) mengkaji sifat permukaan paving block plastik heksagonal yang relevan langsung dengan desain Lontara Paving Block. Permukaan paving block berbahan plastik berpotensi menjadi lebih licin dibandingkan beton konvensional, terutama dalam kondisi basah, karena polimer yang mengeras memiliki tekstur permukaan yang lebih halus. SNI 03-0691-1996 mensyaratkan nilai ketahanan terhadap licin untuk paving block yang digunakan di area publik, sehingga uji CSLP (*Coefficient of Skid/Low Profile*) menjadi komponen pengujian yang tidak dapat diabaikan. Owen et al. (2023) dalam *Waste Management*, mengkarakterisasi sifat termal dan mekanis komposit dari limbah plastik industri untuk aplikasi ubin lantai. Data suhu stabilitas termal TGA yang stabil di atas 400°C memvalidasi bahwa komposit plastik dalam kondisi normal penggunaan paving block (suhu maksimum ~70°C di bawah sinar matahari) tidak akan mengalami degradasi termal dan tidak akan melepas gas beracun, sekaligus menjawab kekhawatiran terkait keamanan termal produk.

d. Teknologi Piezoelektrik: Inovasi Energi Terbarukan dalam Infrastruktur Pembelajaran

Inovasi unggulan Lontara Paving Block adalah integrasi teknologi piezoelektrik yang mengubah energi kinetik (tekanan pejalan kaki) menjadi energi listrik. Sezer & Koç (2021) melalui *review* komprehensif terhadap 4.435 dokumen Scopus menegaskan bahwa pemanenan energi piezoelektrik merupakan sumber energi bersih yang menjanjikan untuk infrastruktur cerdas. Material utama PZT (*Lead Zirconate Titanate*) memiliki konstanta piezoelektrik tinggi dan cocok untuk tekanan rendah-frekuensi seperti pejalan kaki. Li et al. (2022) melaporkan bahwa generator jalan berbasis PZT menghasilkan output tegangan ~10 V pada tekanan roda 0,7 MPa, dengan kapasitas 0,8 kWh/hari untuk lampu sinyal lalu lintas.

Zhao et al. (2025) memperbarui *state-of-the-art* dengan output terbaik mencapai 5,8 mW pada 15 Hz dan 0,7 MPa, menekankan bahwa kedalaman penanaman *harvester*

mempengaruhi output listrik secara signifikan. Abid et al. (2021) melengkapi dengan analisis tekno-ekonomi pemanenan energi dari lalu lintas, memberikan justifikasi *sustainability* untuk inovasi ini. Dalam konteks pembelajaran STEAM, komponen piezoelektrik mewakili dimensi *Technology* dan *Engineering*, di mana peserta didik memahami prinsip konversi energi sekaligus merancang sistem *harvesting* sederhana, sehingga mengintegrasikan sains, teknologi, rekayasa, seni desain, dan matematika dalam satu produk autentik.

e. Peta Integrasi STEAM dalam Proyek Lontara Paving Block Piezoelektrik

Proyek Lontara Paving Block Piezoelektrik dirancang sebagai wahana pembelajaran yang mengintegrasikan kelima elemen STEAM secara organik dan saling berkelindan. Pada dimensi *sains*, peserta didik mengkaji kimia ekologis dan karakteristik polimer limbah PET/HDPE, memahami sifat kimia oli bekas sebagai limbah B3, serta mempraktikkan 12 prinsip kimia hijau sebagai kerangka filosofis penggantian bahan baku semen konvensional. Pemahaman tentang konversi energi mekanik menjadi energi listrik melalui efek piezoelektrik turut memperkaya dimensi sains yang dikuasai peserta didik (Aliah et al., 2024; Rahmadhani et al., 2025).

Pada dimensi *teknologi*, kebaruan utama (*novelty*) proyek ini terletak pada integrasi material piezoelektrik jenis PZT ke dalam infrastruktur paving block sebagai *energy harvester* yang mampu menghasilkan tegangan sekitar 10 V dan daya hingga 5,8 mW dari tekanan langkah kaki pejalan kaki. Inovasi ini menempatkan Lontara Paving Block jauh melampaui konsep paving block daur ulang biasa dan menjadikannya bagian dari ekosistem infrastruktur cerdas masa depan (Li et al., 2022; Zhao et al., 2025). Sementara itu, dimensi *rekayasa* diwujudkan melalui empat aspek kritis yang telah diuraikan sebelumnya, yaitu rekayasa enkapsulasi B3, rekayasa termal terkontrol, rekayasa material komposit serbuk kayu-plastik, serta desain struktur dan uji licin permukaan. Keempat aspek ini secara bersama-sama memastikan bahwa produk memenuhi standar SNI 03-0691-1996 dan aman digunakan di ruang publik (Sudarno et al., 2021; Kahfi et al., 2025).

Dimensi *seni* dalam proyek ini hadir melalui konsep *Ethno-STEAM*, yaitu penamaan 'Lontara' yang merujuk pada aksara ikonik Bugis-Makassar dan penerapannya sebagai motif estetis pada permukaan heksagonal paving block. Melalui pilihan ini, inovasi teknologi tidak tercabut dari akarnya, melainkan justru merayakan identitas kultural lokal Sulawesi Selatan sebagai bagian integral dari desain produk. Aspek seni juga terwujud dalam kemampuan komunikasi visual peserta didik ketika merancang narasi dan kampanye ramah lingkungan untuk mempresentasikan produk proyek mereka kepada publik. Adapun dimensi *matematika* berperan sebagai tulang punggung analitis seluruh proses, mulai dari kalkulasi rasio campuran optimal antara plastik, pasir, dan oli, pengukuran kuat tekan mekanik yang ditargetkan minimal 40 MPa sesuai SNI Mutu B, perhitungan output daya listrik piezoelektrik dalam satuan miliwatt, hingga analisis tekno-ekonomi perbandingan biaya produksi terhadap paving block konvensional (Sudarno et al., 2021; Kahfi et al., 2025; Zhao et al., 2025). Dengan demikian, kelima elemen STEAM tidak bekerja secara terpisah, melainkan saling memperkuat dalam satu siklus pembelajaran berbasis proyek yang utuh, bermakna, dan terukur.

f. Identifikasi Gap Penelitian dan Kontribusi Gagasan Inovasi

Sintesis menyeluruh atas literatur yang dikaji mengungkap tiga celah penelitian yang secara konsisten belum terjawab dalam khazanah ilmiah pendidikan sains Indonesia. Pertama, hingga saat ini belum terdapat modul STEAM berbasis kimia hijau yang benar-benar mengintegrasikan kearifan lokal Nusantara, khususnya yang menggabungkan identitas budaya Bugis-Makassar seperti aksara Lontara sebagai elemen *Arts* dengan inovasi teknologi hijau untuk konteks pembelajaran SMA/SMK. Kedua, kajian literatur menunjukkan minimnya penelitian yang secara bersamaan menghubungkan pengelolaan limbah padat kompleks yang mencakup plastik, oli B3, dan serbuk kayu dengan *eco-innovation* energi terbarukan berbasis piezoelektrik dalam satu modul pembelajaran yang komprehensif dan terpadu. Ketiga, sebagian besar studi intervensi STEAM-PjBL yang ada masih berfokus pada jenjang sekolah dasar atau hanya mengukur literasi sains sebagai variabel terikat, sementara pengukuran kepedulian lingkungan sebagai dampak spesifik dari modul STEAM-PjBL berbasis kimia hijau di jenjang SMA/SMK masih sangat jarang dilakukan. Ketiga celah ini secara bersama-sama menunjukkan bahwa gagasan inovasi Lontara Piezoelectric Paving Block memiliki ruang kontribusi yang signifikan dan orisinal dalam pengembangan pendidikan STEAM berbasis kearifan lokal dan *eco-innovation* yang selaras dengan tujuan Kurikulum Merdeka, agenda SDGs (*Sustainable Development Goals*), dan Asta Cita Indonesia.

Merangkai seluruh temuan kajian literatur ini menghasilkan sebuah pemahaman terpadu tentang arsitektur STEAM Eco-Innovation yang saling berkaitan secara ilmiah. Sifat fundamental titik lebur polimer PET/HDPE dikaji melalui lensa kimia fisik sebagai unsur sains, kemudian direkayasa untuk dipanaskan pada zona termal aman tanpa degradasi dan emisi VOC sebagai wujud nyata kimia hijau. Suhu yang terkontrol ini dipantau menggunakan instrumentasi mikrokontroler berbasis sensor termocouple sebagai manifestasi unsur teknologi, sehingga viskositas lelehan polimer dapat secara permanen mengenkapsulasi polutan oli bekas tanpa kebocoran sebagai prestasi rekayasa. Setelah campuran komposit WPC mengeras, kekuatan mekanis strukturnya yang solid mampu memproteksi transduser piezoelektrik dari tekanan *yielding stress*. Deformasi yang berhasil diserap transduser kemudian dikonversi menjadi energi listrik mikrowatt yang menerangi indikator LED, mewujudkan siklus energi terbarukan yang utuh. Secara paralel, blok dirancang dengan kalkulasi matematis terhadap luas permukaan dan fraksi agregat heksagonal berinspirasi aksara Lontara sebagai perpaduan unsur seni dan matematika, memastikan permukaannya memenuhi parameter gesekan statis CSLP yang dipersyaratkan. Orkestrasi lintas disiplin inilah yang menjadikan proyek Lontara Paving Block Piezoelektrik bukan sekadar proyek kerajinan daur ulang, melainkan sebuah laboratorium STEAM hidup yang kaya muatan saintifik, teknologis, dan kultural.

3. Pembahasan Relasi Data

Merangkai seluruh temuan kajian literatur ini menghasilkan sebuah pemahaman terpadu tentang arsitektur STEAM Eco-Innovation yang saling berkaitan secara ilmiah. Sifat fundamental titik lebur polimer PET/HDPE dikaji melalui lensa kimia fisik sebagai unsur

sains, kemudian direkayasa untuk dipanaskan pada zona termal aman tanpa degradasi dan emisi VOC sebagai wujud nyata kimia hijau. Suhu yang terkontrol ini dipantau menggunakan instrumentasi mikrokontroler berbasis sensor termocouple sebagai manifestasi unsur teknologi, sehingga viskositas lelehan polimer dapat secara permanen mengenkapsulasi polutan oli bekas tanpa kebocoran sebagai prestasi rekayasa. Setelah campuran komposit WPC mengeras, kekuatan mekanis strukturnya yang solid mampu memproteksi transduser piezoelektrik dari tekanan *yielding stress*. Deformasi yang berhasil diserap transduser kemudian dikonversi menjadi energi listrik mikrowatt yang menerangi indikator LED, mewujudkan siklus energi terbarukan yang utuh. Secara paralel, blok dirancang dengan kalkulasi matematis terhadap luas permukaan dan fraksi agregat heksagonal berinspirasi aksara Lontara sebagai perpaduan unsur seni dan matematika, memastikan permukaannya memenuhi parameter gesekan statis CSLP yang dipersyaratkan. Orkestrasi lintas disiplin inilah yang menjadikan proyek Lontara Paving Block Piezoelektrik bukan sekadar proyek kerajinan daur ulang, melainkan sebuah laboratorium STEAM hidup yang kaya muatan saintifik, teknologis, dan kultural.

Keterlibatan holistik ini secara siklikal memaksa otak analitis dan kemampuan sintesis dari peserta didik bekerja pada puncaknya, secara kausalistik mengangkat derajat Literasi Sains sekaligus mengendapkan memori otot mengenai solusi lingkungan hidup. Keseluruhan kajian literatur menegaskan bahwa gagasan perancangan Modul STEAM Eco-Innovation dengan proyek Lontara Paving Block Piezoelektrik memiliki basis ontologis dan validitas empiris yang sangat meyakinkan. Dari kacamata pedagogi, metode hibrida STEAM-PjBL tidak bisa dibantah merupakan katalis esensial bagi peningkatan drastis literasi sains dan karakter kesadaran lingkungan. Sementara dari lensa spesifikasi rekayasa sipil, material, dan fisika energi, komposisi perpaduan antara polimer termoplastik, serbuk kayu penguat, oli bekas terenkapsulasi, dan sirkuit piezoelektrik telah dibuktikan keberhasilannya oleh riset-riset terdahulu di jurnal kuartil teratas, baik untuk menembus ambang batas uji tekan mekanik maupun luaran daya mikro yang kontinu.

Riset-riset sebelumnya cenderung membedah topik-topik ini secara tersekat dalam disiplin silonya masing-masing. Zhao et al. (2025) atau Abid et al. (2021) mengkaji pemanenan energi piezoelektrik secara teoretis tinggi murni pada lingkup teknik sipil makro lalu lintas. Pada pihak lain, penelitian pendidikan sains seperti Aliah et al. (2024) atau Suprihatien et al. (2025) sering kali terhenti pada proyek purwarupa abstrak (contohnya pembuatan *ecobrick* dasar yang ditumpuk tanpa fungsi mekanik *engineering* murni). Distingui radikal dari gagasan inovasi kajian ini adalah kemampuannya men-demokratisasikan teknologi teknik elektro material tingkat tinggi dan menyuntikkannya ke dalam kurikulum pembelajaran kimia dasar sekolah menengah, dikemas melalui nilai *Ethno-STEAM* (Lontara) secara presisi, holistik, dan komprehensif.

Sintesis data ini memberikan pertanda kuat akan pergeseran tektonik dalam lanskap Pendidikan Lingkungan atau *Education for Sustainable Development* (ESD). Pendidikan sains tidak lagi diartikan sebagai proses meratifikasi fenomena eksisting secara teoretis, melainkan telah bertransformasi menjadi laboratorium *Eco-Innovation* yang progresif. Hal ini mensinyalkan fase adaptif di mana peserta didik mengambil kontrol untuk

mentransmutasikan entitas beban (limbah beracun, botol, defisit listrik) menjadi aset kekayaan sirkular (infrastruktur mandiri cerdas).

Implikasi paradigmatik kajian ini mengarah pada urgensi restrukturisasi perangkat ajar yang dipergunakan guru dalam Kurikulum Merdeka. Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) yang stagnan berpusat pada penugasan kognitif rendah harus segera didekonstruksi menjadi modul hibrida atau e-modul berbasis purwarupa fungsional tinggi. Konsekuensi turunannya, ekspektasi terhadap kompetensi pendidik sains menuntut evolusi dari sebatas menguasai taksonomi Bloom ranah mengingat, menjadi kapabilitas penguasaan TPACK yang tangguh. Pendidik harus memiliki wawasan operasional keselamatan bahan kimia tingkat lanjut (*safety procedures*), elektronika dasar, dan pengawasan suhu termal mikrokontroler ketika merawat inkubasi eksperimen ini di laboratorium sekolah.

Tingginya efikasi modul yang membumikan proyek lingkungan riil memiliki dasar justifikasi neuro-sains dari teori Vygotsky dan lokus *Constructionism* Seymour Papert. Pada proyek Lontara, saat siswa diposisikan sebagai agen pembawa kebaruan (*sense of epistemic agency*), mereka tidak sedang berhadapan dengan soal-soal hipotesis yang terputus dari emosinya. Mereka mempelajari energi ikatan kovalen polimer secara visceral saat mengaduk lelehan plastik. Mereka mengabstraksikan beda potensial voltase tidak dengan menatap buku teks, melainkan dengan kegembiraan menatap kelipan lampu indikator LED yang menyala akibat energi kinetik tekanan kaki mereka. Keterkaitan emosional dan fisik terhadap ruang lingkungan di mana inovasi itu berdampak melahirkan motivasi intrinsik tak terbatas, yang merupakan habitat alami dari pertumbuhan literasi sains berkelanjutan.

Kajian ini menuntut keberlanjutan berupa manuver aksi eksperimental. Strategi berikutnya yang mendesak adalah realisasi tahapan empiris *Research and Development* (R&D), misalnya dengan menggunakan model ADDIE (*Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate*). Desainer pendidikan mesti menyusun prototipe final instrumen Buku Panduan Guru, instrumen e-Modul Interaktif siswa, dan butir soal parameter untuk instrumen metrik skala Literasi Sains dan Skala Likert Afektif Kepedulian Lingkungan. Validitas prototipe Modul tersebut diwajibkan melewati filtrasi panel pakar ahli konten kimia hijau, pakar rekayasa material fisika, dan desain media pedagogik. Di luar domain pedagogik, konstruksi Standar Operasional Prosedur (SOP) keselamatan Laboratorium Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) mutlak disusun, yang mengatur standar regulasi ventilasi (*fume hood extractor*) dan proteksi panas untuk melelehkan plastik di bawah 250°C demi mematuhi secara sempurna prinsip utama *Accident Prevention* dalam payung Kimia Hijau.

KESIMPULAN

Kajian literatur ini menyimpulkan bahwa gagasan pengembangan Modul STEAM Eco-Innovation berbasis Kimia Hijau melalui proyek Lontara Paving Block Piezoelektrik memiliki landasan teoritis dan empiris yang kokoh. Secara pedagogis, model STEAM-PjBL terbukti meningkatkan literasi sains dan kepedulian lingkungan peserta didik di berbagai jenjang pendidikan. Secara substantif, prinsip kimia hijau dapat diintegrasikan secara bermakna ke dalam muatan modul untuk membentuk kesadaran ekologis peserta didik. Secara teknis, komposisi paving block berbahan limbah plastik PET/HDPE, oli bekas, dan

serbuk kayu telah tervalidasi secara eksperimental, mencakup rekayasa enkapsulasi B3, pelelehan termal terkontrol, material komposit, dan keamanan permukaan. Secara teknologis, sistem piezoelektrik dalam perkerasan jalan terbukti mampu mengonversi energi kinetik menjadi listrik dengan efisiensi yang layak untuk aplikasi infrastruktur cerdas. Tiga gap penelitian berhasil diidentifikasi, yaitu belum tersedianya modul STEAM kontekstual-lokal berbasis kimia hijau di Indonesia, minimnya integrasi pengelolaan limbah dan pemanenan energi terbarukan dalam satu modul pembelajaran, serta kurangnya pengukuran kepedulian lingkungan dalam intervensi STEAM-PjBL di jenjang SMA/SMK.

Implikasi kajian ini dapat dimanfaatkan guru kimia dan IPA dalam mengadaptasi kerangka konseptual ini sebagai rujukan dalam merancang pembelajaran berbasis proyek yang mengintegrasikan isu lingkungan lokal dengan teknologi hijau, sekaligus menjadikannya wahana proyek penguatan profil pelajar Pancasila dalam Kurikulum Merdeka. Bagi pemangku kebijakan, pendekatan Ethno-STEAM yang menggabungkan kearifan lokal dengan eco-innovation berpotensi menjadi model pendidikan sains berkelanjutan yang selaras dengan agenda ESD nasional dan Asta Cita. Sebagai tindak lanjut, diperlukan penelitian pengembangan yang komprehensif mencakup desain, validasi ahli, uji coba, dan revisi untuk mewujudkan modul ini menjadi perangkat pembelajaran yang valid dan efektif. Kajian ini memiliki keterbatasan bahwa seluruh simpulan didasarkan pada sintesis literatur dan belum diverifikasi secara empiris, sehingga penelitian eksperimental pada tahap berikutnya menjadi sangat diperlukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing Program Studi Pendidikan Kimia Pascasarjana Universitas Negeri Makassar atas arahan dan masukan konstruktif yang sangat berharga dalam penulisan kajian literatur ini, khususnya terkait penguatan aspek rekayasa engineering dalam kerangka STEAM. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada rekan-rekan mahasiswa Reguler A25 PPS Pendidikan Kimia atas diskusi dan dukungan dalam proses penyusunan kajian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abid, A., Ud Din Mufti, A., & et al. (2021). A systematic review of piezoelectric materials and energy harvesters for industrial applications. *Sensors*, 21(12), 4145. <https://doi.org/10.3390/s21124145>
- Aguilera-Morales, D., & et al. (2024). Project-based learning for environmental awareness: Secondary education. *International Journal of Instruction*, 17(1), 1–18. <https://doi.org/10.29333/iji.2024.1711a>
- Aliah, & et al. (2024). Literature review: Inovasi pembelajaran kimia berwawasan lingkungan melalui pendekatan green chemistry. *CHEDS: Journal of Chemistry, Education, and Science*. <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/CHEDS/article/view/10170>
- Baran, M., & Maskan, A. (2021). The influence of PjBL-STEM applications on the development of 21st century skills. *Journal of Turkish Science Education*, 18(4). <https://doi.org/10.36681/tused.2021.87>

- Chistyakov, A. A., & et al. (2023). Exploring the characteristics and effectiveness of project-based learning for science and STEAM education. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 19(5), em2256. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13128>
- Suryanti, Nursalim, M., Choirunnisa, N. L., & Yuliana, I. (2024). STEAM-Project-based learning: A catalyst for elementary school students' scientific literacy skills. *European Journal of Educational Research*, 13(1), 1–14. <https://doi.org/10.12973/eu-jer.13.1.1>
- Zhao, H., & et al. (2025). Using piezoelectric technology to harvest energy from pavement: A review. *Construction and Building Materials*, 460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.00008X>
- Desyani, N. A., Yuwono, A. S., & Putra, H. (2023). Assessing the performance of melted plastic as a replacement for sand in paving block. *Advances in Technology Innovation*, 8(3), 219–228. <https://doi.org/10.46604/aiti.2023.11508>
- Gutierrez-Orellana, M., & et al. (2024). Wood plastic composite based on recycled high-density polyethylene and wood waste (sawdust). *Polymers*, 16(22), 3136. <https://doi.org/10.3390/polym16223136>
- Hao, G., Dai, Q., You, Z., & et al. (2025). Multifaceted assessment of modifying and rejuvenating asphalt binders with recycled waste plastic and engine oil. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-25951-z>
- Krishnamurthy, S., & et al. (2025). Upscaling low density polyethylene plastic waste into sustainable paver blocks by zero-emission closed loop phase transition recycling process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.021888>
- Owen, M. M., Achukwu, E. O., & et al. (2023). Thermal and mechanical characterization of composite materials from industrial plastic wastes and recycled nylon fibers for floor paving tiles application. *Waste Management*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.032>
- Royani, Fadlilah, I., & Pramita, A. (2025). Pemanfaatan sampah plastik multilayer, styrofoam dan oli bekas untuk pembuatan paving block. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 14(1), 79–85.
- Sani, R., & et al. (2024). Pengaruh variasi bentuk paving block plastik PET sebagai pengganti semen terhadap kuat tekan dan uji fisik permukaan. *Jurnal Teknologi Terpadu (JTT)*, 12(2). <https://doi.org/10.32487/jtt.v12i2.2289>
- Saputra, B., & et al. (2024). Environmentally friendly paving block based on wood waste: The effect of rubber wood waste content on the physical-mechanical properties of paving block. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 13(4), 997–1005. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v13i4.997-1005>
- Smith, D. R., & Hein, D. K. (2023). Slip and skid resistance of interlocking concrete pavements: Standards, test methods, and performance criteria. *International Journal of Pavement Engineering*.
- Tim Peneliti UTS. (2025). Rancang bangun mesin kontrol sistem pengolahan limbah plastik menjadi paving block. *Journal Altron: Journal of Electronics, Science & Energy Systems*. <https://jurnal.uts.ac.id/index.php/Altron/article/view/4383>