Vol. 12 No. 02 Oktober (2026) Halaman Artikel (159-166)

JURNAL TEKNIK SIPIL : RANCANG BANGUN

Website: https://ejournal.um-sorong.ac.id/index.php/rancangbangun

STUDI EKSPERIMENTAL AWAL RESPONS PIEZOELEKTRIK PADA PAVING BLOCK BERPORI HEXAGONAL BERBASIS ABU SEKAM PADI (BIO-PIEZOBLOCK)

PRELIMINARY EXPERIMENTAL STUDY OF PIEZOELECTRIC RESPONSE IN HEXAGONAL POROUS PAVING BLOCKS BASED ON RICE HUSK ASH (BIO-PIEZOBLOCK)

Bahar Amal[1*]

(1) Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

Abstrak

Pengembangan material perkerasan berpori yang mampu mendukung fungsi perkerasan sekaligus merespons beban mekanis akibat aktivitas manusia merupakan salah satu pendekatan dalam pengembangan infrastruktur perkotaan multifungsi dan berkelanjutan. Penelitian ini merupakan studi eksperimental awal untuk mengembangkan dan mengevaluasi prototipe BIO-PIEZOBLOCK berupa paving block berpori berbentuk hexagonal berbasis abu sekam padi (ASP) 8% yang diintegrasikan dengan elemen piezoelektrik. Penelitian bertujuan mengevaluasi karakteristik kuat tekan paving block serta respons tegangan piezoelektrik berdasarkan variasi jumlah dan distribusi elemen. Pengujian kuat tekan dilakukan terhadap lima benda uji pada umur 28 hari, sedangkan pengujian piezoelektrik dilakukan dengan variasi 1, 2, 6, dan 24 elemen. Pada konfigurasi 24 elemen, dibandingkan susunan tersebar pada beberapa posisi dengan susunan terkonsentrasi pada satu zona injakan. Hasil pengujian menunjukkan kuat tekan paving block sebesar 9,82–11,50 MPa dengan nilai rata-rata 10,51 ± 0,65 MPa. Pada pengujian piezoelektrik, konfigurasi 1, 2, dan 6 elemen serta 24 elemen yang tersebar menghasilkan respons tegangan yang relatif kecil, yaitu kurang dari 0,05 V AC. Sebaliknya, konfigurasi 24 elemen yang terkonsentrasi pada zona injakan menghasilkan respons sebesar 0,10–0,30 V AC, sedangkan keluaran DC yang teramati setelah proses konversi sekitar 0,1 V. Hasil tersebut menunjukkan bahwa efektivitas transfer beban dan distribusi elemen piezoelektrik berpotensi lebih berpengaruh terhadap respons tegangan dibandingkan jumlah elemen semata. Secara keseluruhan, BIO-PIEZOBLOCK menunjukkan potensi awal sebagai konsep paving block berpori dengan fungsi tambahan berupa respons piezoelektrik. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi arus, daya, energi, karakteristik pembebanan, porositas, infiltrasi, dan durabilitas secara kuantitatif.

Kata Kunci: abu sekam padi, drainase perkotaan, paving block berpori, piezoelektrik

Abstract

This preliminary experimental study evaluated the compressive strength and piezoelectric voltage response of BIO-PIEZOBLOCK, a hexagonal porous paving block incorporating 8% rice husk ash and piezoelectric elements. Five specimens were tested in compression at 28 days. Voltage response under foot loading was measured for configurations with 1, 2, 6, and 24 elements. For the 24-element configuration, elements distributed across several positions were compared with elements concentrated in one loading zone. Compressive strength ranged from 9.82 to 11.50 MPa, with a mean of 10.51 ± 0.65 MPa. Configurations with 1, 2, and 6 elements and the distributed 24-element configuration produced less than 0.05 V AC. The concentrated 24-element configuration produced 0.10–0.30 V AC, with an observed output of approximately 0.1 V DC after conversion. These preliminary observations suggest that element placement and load transfer can influence voltage response. Further testing is needed to quantify current, power, energy, loading characteristics, porosity, infiltration, and durability.

Keywords: *piezoelectric, porous paving block, rice husk ash, urban drainage*

PENDAHULUAN

Perkembangan kawasan perkotaan meningkatkan kebutuhan terhadap infrastruktur yang tidak hanya mampu memenuhi fungsi struktural, tetapi juga mendukung aspek lingkungan dan keberlanjutan. Salah satu permasalahan yang banyak dijumpai pada kawasan perkotaan adalah peningkatan limpasan permukaan akibat bertambahnya area kedap air. Sistem perkerasan konvensional dapat membatasi infiltrasi air hujan sehingga meningkatkan beban sistem drainase dan berpotensi memperbesar risiko genangan. Oleh karena itu, pengembangan material perkerasan yang memiliki kemampuan infiltrasi menjadi salah satu pendekatan dalam mendukung pengelolaan limpasan permukaan secara berkelanjutan.

Paving block berpori merupakan salah satu alternatif yang dapat dikembangkan untuk mendukung fungsi tersebut. Material dengan struktur berpori memungkinkan air melewati lapisan permukaan sehingga dapat mengurangi limpasan permukaan. Namun, peningkatan porositas umumnya perlu dipertimbangkan terhadap penurunan kekuatan mekanik. Pada material berbasis abu sekam padi (*rice husk ash*/RHA), karakteristik tersebut menjadi semakin penting karena sifat RHA dipengaruhi oleh

(*)Corresponding author
Telp :
E-mail : bahar.amal@ft.unsika.ac.id
http://doi.org/0.33506/rb.v12i02.6328
Received xx Bulan Tahun; Accepted xx Bulan Tahun; Available online xx Bulan Tahun
E-ISSN: 2614-4344 P-ISSN: 2476-8928

proses pembakaran, ukuran partikel, kandungan silika, serta proporsi substitusinya dalam campuran. Kajian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan RHA dalam material perkerasan berpori memiliki potensi untuk meningkatkan keberlanjutan material, tetapi proporsi dan karakteristik RHA perlu dioptimalkan agar keseimbangan antara kekuatan dan permeabilitas tetap tercapai (Khankhaje et al., 2025).

Selain fungsi drainase, aktivitas manusia pada permukaan perkerasan menghasilkan beban mekanik berulang yang secara prinsip dapat dimanfaatkan melalui teknologi pemanenan energi piezoelektrik. Teknologi tersebut mengubah deformasi mekanik menjadi energi listrik melalui material piezoelektrik. Penelitian mengenai penerapan piezoelektrik pada pavement menunjukkan bahwa besarnya respons listrik dipengaruhi oleh konfigurasi elemen, karakteristik pembebanan, sistem transfer beban, posisi transduser, rangkaian listrik, serta kondisi pembebanan (Li et al., 2022; Mou et al., 2025). Penelitian Song et al. (2019), misalnya, mengembangkan *pavement block piezoelectric energy harvester* dengan 24 elemen piezoelektrik yang disusun dalam struktur berlapis. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa konfigurasi rangkaian dan karakteristik pembebanan dapat memengaruhi keluaran listrik yang diperoleh.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian piezoelektrik pada pavement berfokus pada peningkatan keluaran energi, sedangkan integrasi antara material perkerasan berpori berbasis limbah pertanian dan pemanenan energi piezoelektrik masih relatif terbatas. Di sisi lain, penggunaan RHA pada material perkerasan lebih banyak diteliti dari aspek kuat tekan, penyerapan air, durabilitas, dan limpasan, tanpa mengintegrasikan fungsi pemanenan energi mekanik. Kondisi tersebut membuka peluang pengembangan konsep material perkerasan multifungsi yang menghubungkan fungsi drainase dengan pemanenan energi skala mikro.

Penelitian ini mengembangkan prototipe awal **BIO-PIEZOBLOCK**, yaitu paving block berpori berbentuk hexagonal berbasis abu sekam padi yang dilengkapi elemen piezoelektrik. Bentuk hexagonal dipilih sebagai konfigurasi awal karena dapat digunakan dalam sistem perkerasan modular dan memungkinkan pengaturan zona pembebanan pada elemen piezoelektrik. Fokus penelitian bukan untuk menyatakan bahwa prototipe telah menghasilkan energi listrik yang besar, tetapi untuk mengevaluasi respons awal piezoelektrik dan mengidentifikasi konfigurasi penempatan elemen yang memberikan respons paling terlihat.

Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi respons tegangan awal pada prototipe BIO-PIEZOBLOCK dengan beberapa jumlah dan konfigurasi elemen piezoelektrik serta mengidentifikasi pengaruh distribusi elemen terhadap respons listrik akibat injakan manusia. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar untuk pengembangan lebih lanjut terkait optimasi desain, karakterisasi mekanik-hidraulik, dan pemanenan energi mikro pada material perkerasan berpori.

TINJAUAN PUSTAKA

Paving Block Berpori

Paving block berpori merupakan material perkerasan yang dirancang dengan adanya rongga atau jalur pori untuk memungkinkan air melewati permukaan perkerasan. Kinerja sistem tersebut dipengaruhi oleh porositas, ukuran dan konektivitas pori, gradasi agregat, karakteristik bahan pengikat, serta struktur lapisan perkerasan.

SNI 03-0691-1996 merupakan standar untuk bata beton atau paving block dan mencakup karakteristik seperti dimensi, kuat tekan, dan penyerapan air. Untuk pengujian infiltrasi permukaan pada sistem *permeable unit pavement*, ASTM C1781/C1781M dapat digunakan sebagai acuan.

Kuat tekan paving block secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$f_c = \frac{P}{A}$$

dengan:
(fc) = kuat tekan (MPa),
(P) = beban maksimum saat benda uji mengalami keruntuhan (N),
(A) = luas penampang tekan (mm²).

Persamaan tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan apabila pengujian kuat tekan dilakukan pada pengembangan BIO-PIEZOBLOCK berikutnya.

Penyerapan air dapat dinyatakan dengan:

$$WA = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100\%$$

dengan:
(WA) = penyerapan air (%),
(Ws) = berat benda uji dalam kondisi jenuh (g),
(Wd) = berat benda uji dalam kondisi kering (g).

Abu Sekam Padi sebagai Material Tambahan

Sekam padi merupakan salah satu limbah pertanian yang dapat menghasilkan abu dengan kandungan silika relatif tinggi setelah proses pembakaran yang sesuai. Karakteristik RHA dipengaruhi oleh temperatur pembakaran, durasi pembakaran, ukuran partikel, dan proses penggilingan.

RHA telah banyak diteliti sebagai bahan substitusi sebagian semen maupun material tambahan pada beton dan paving block. Penggunaannya dapat

memengaruhi kuat tekan, penyerapan air, porositas, dan karakteristik limpasan.

Pada penelitian ini, RHA ditempatkan sebagai bagian dari konsep material BIO-PIEZOBLOCK. Namun, artikel ini difokuskan pada respons awal piezoelektrik prototipe, sehingga pengaruh kuantitatif variasi kadar RHA terhadap karakteristik mekanik dan hidraulik belum menjadi hasil utama.

Pemanenan Energi Piezoelektrik

Material piezoelektrik menghasilkan respons listrik ketika mengalami deformasi mekanik. Dalam aplikasi pavement, beban manusia dapat diteruskan menuju elemen piezoelektrik sehingga menghasilkan respons listrik.

Untuk rangkaian dengan beban resistif, hubungan dasar antara tegangan dan arus dapat dituliskan:

$$I = \frac{V}{R}$$

dengan:
(I) = arus listrik (A),
(V) = tegangan listrik (V),
(R) = resistansi beban (Ω).

Daya listrik dapat dihitung menggunakan:

$$P = V \times I$$

atau, apabila beban resistif diketahui:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

dengan (P) adalah daya listrik (W).

Energi listrik yang dihasilkan selama interval waktu tertentu dapat dinyatakan sebagai:

$$E = P \times t$$

dengan:
(E) = energi listrik (J),
(P) = daya listrik (W),
(t) = durasi pengukuran (s).

Untuk kondisi keluaran yang berubah terhadap waktu, energi dapat dianalisis secara lebih umum dan menjadi dasar analisis energi pada tahap pengembangan berikutnya. Dalam penelitian ini, arus, resistansi beban, daya, dan energi belum diukur secara kuantitatif, sehingga persamaan tersebut tidak digunakan untuk mengklaim nilai daya atau energi BIO-PIEZOBLOCK.

Konfigurasi Elemen dan Transfer Beban

Jumlah elemen piezoelektrik tidak secara otomatis menghasilkan peningkatan keluaran listrik apabila deformasi mekanik tidak diteruskan secara efektif kepada elemen tersebut. Distribusi elemen, posisi terhadap zona pembebanan, lapisan pelindung, dan mekanisme transfer beban merupakan bagian penting dalam desain piezoelectric pavement.

METODE

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen untuk mengkaji karakteristik mekanik dan respons awal piezoelektrik pada prototipe paving block berpori berbentuk hexagonal berbasis abu sekam padi (ASP) 8% (BIO-PIEZOBLOCK). Penelitian diawali dengan persiapan dan kajian literatur, dilanjutkan dengan perancangan prototipe, pembuatan paving block, pemasangan elemen piezoelektrik, serta perakitan sistem BIO-PIEZOBLOCK. Pengujian mekanik dilakukan melalui pengujian kuat tekan paving block pada umur 28 hari, sedangkan pengujian piezoelektrik dilakukan dengan memberikan pembebanan berupa injakan manusia pada permukaan prototipe untuk menghasilkan respons listrik pada elemen piezoelektrik.

Pendekatan yang digunakan adalah eksperimen dan deskriptif-komparatif. Pengujian kuat tekan dilakukan terhadap lima benda uji paving block hexagonal berbasis ASP 8%. Pengujian piezoelektrik dilakukan dengan memberikan variasi jumlah dan konfigurasi elemen piezoelektrik, yaitu 1, 2, 6, dan 24 elemen. Pada konfigurasi 24 elemen, dilakukan perbandingan antara penempatan elemen secara tersebar pada beberapa posisi dan penempatan secara terpusat pada satu zona injakan. Variasi tersebut digunakan untuk mengetahui perbedaan karakteristik kuat tekan serta respons listrik berdasarkan jumlah dan distribusi elemen piezoelektrik.

Pengumpulan data dilakukan melalui pengujian kuat tekan dan pengukuran respons tegangan listrik. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan mencatat beban maksimum yang diterima benda uji, kemudian kuat tekan dihitung berdasarkan perbandingan antara beban maksimum dan luas bidang tekan. Pengukuran respons piezoelektrik dilakukan menggunakan multimeter untuk mengukur keluaran tegangan AC sebelum proses konversi AC-DC dan keluaran tegangan DC setelah proses konversi. Selain pengukuran tersebut, dilakukan dokumentasi terhadap dimensi dan prototipe paving block, konfigurasi elemen piezoelektrik, serta proses fabrikasi dan pengujian sebagai data pendukung.

Data hasil pengujian ditabulasi dan dianalisis secara deskriptif-komparatif. Data kuat tekan dianalisis berdasarkan nilai masing-masing benda uji, nilai rata-rata, dan simpangan hasil pengujian untuk menggambarkan karakteristik mekanik paving block ASP 8%. Data piezoelektrik dianalisis dengan membandingkan respons tegangan pada setiap variasi jumlah dan konfigurasi elemen, yaitu 1, 2, 6, dan 24

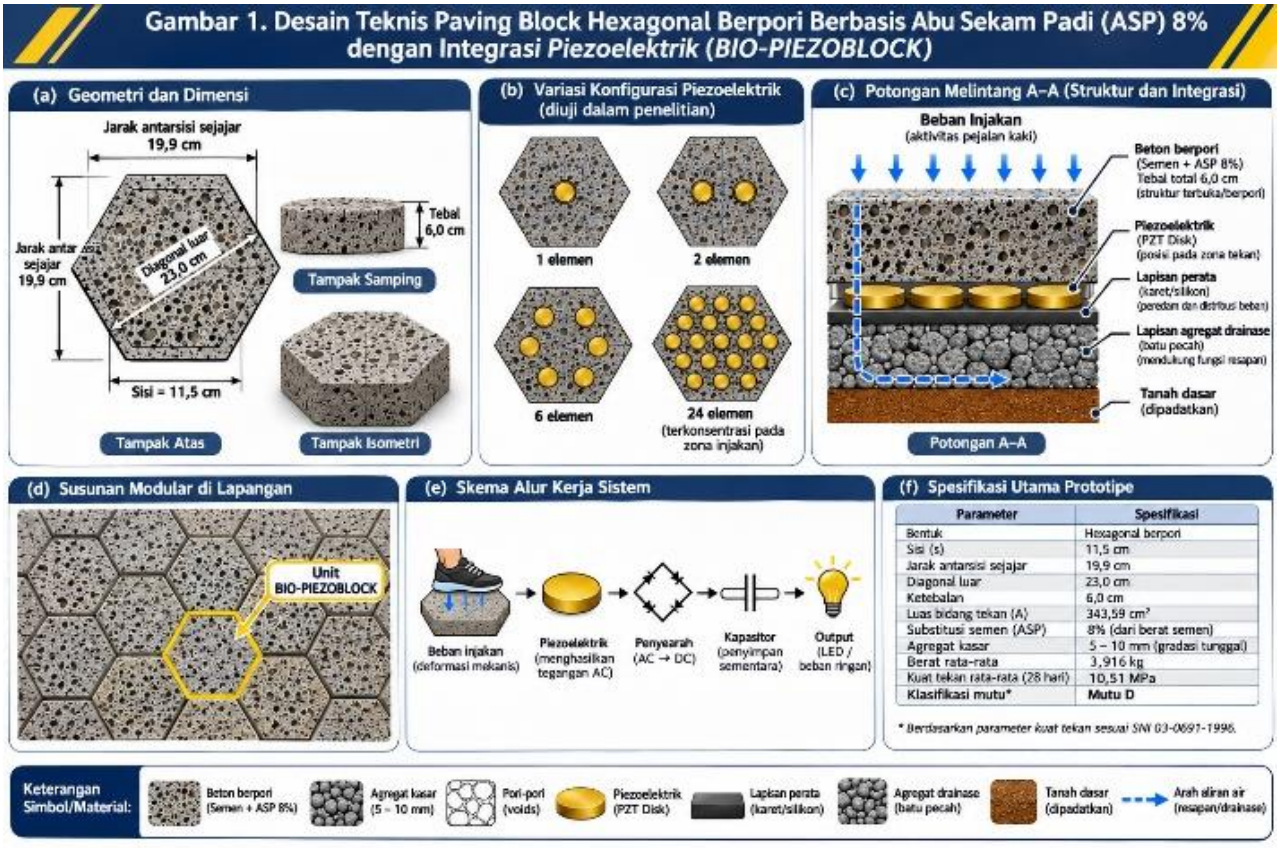
elemen, termasuk perbandingan konfigurasi 24 elemen yang tersebar dan terpusat. Analisis difokuskan pada identifikasi konfigurasi yang memberikan respons listrik paling terlihat serta keterkaitannya dengan mekanisme transfer beban pada prototipe. Hasil analisis selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi potensi awal BIO-PIEZOBLOCK sebagai paving block berpori dengan fungsi tambahan berupa respons piezoelektrik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain dan Karakteristik

BIO-PIEZOBLOCK dikembangkan sebagai paving block berpori berbentuk hexagonal dengan substitusi sebagian semen menggunakan Abu Sekam Padi (ASP) sebesar 8% dan integrasi elemen piezoelektrik. Konsep ini menggabungkan fungsi utama sebagai elemen perkerasan dengan fungsi tambahan berupa pemanfaatan respons mekanis akibat injakan untuk menghasilkan respons listrik.

Prototipe memiliki panjang sisi 11,5 cm, jarak antarsisi sejajar 19,9 cm, diagonal luar sekitar 23,0 cm, dan ketebalan 6,0 cm. Material menggunakan agregat kasar berukuran 5–10 mm dengan sistem gradasi tunggal untuk mempertahankan rongga antarbutir. Struktur tersebut dirancang sebagai *pervious concrete* sehingga keberadaan pori menjadi bagian penting dari karakteristik material.



Gambar 1. Desain teknis paving block hexagonal berpori berbasis ASP 8%
Sumber: Editor, 2026

Nilai tersebut sesuai dengan luas bidang tekan yang digunakan dalam perhitungan kuat tekan. Massa lima benda uji berada pada rentang 3.890–3.960 g dengan rata-rata 3.916 g atau sekitar 3,92 kg. Standar deviasi massa sebesar 28,1 g menunjukkan bahwa variasi massa antar benda uji relatif kecil.

Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa prototipe memiliki dimensi dan massa yang relatif seragam. Bentuk hexagonal juga memberikan keuntungan dari sisi modularitas karena unit dapat disusun berulang untuk membentuk bidang perkerasan yang lebih luas. Sementara itu, struktur berpori memberikan peluang untuk dikembangkan sebagai elemen perkerasan yang memiliki fungsi tambahan dalam pengelolaan limpasan air.

Hasil dan Analisis Kuat Tekan ASP 8%

Pengujian kuat tekan dilakukan pada lima benda uji paving block ASP 8% pada umur 28 hari, yaitu tanggal 11 Agustus 2026. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kapasitas mekanik awal material sebelum integrasi dan evaluasi fungsi piezoelektrik. Kuat tekan dihitung menggunakan persamaan:

$$f_c = \frac{P}{A}$$

dengan:

(fc) = kuat tekan (MPa),
(P) = beban maksimum saat benda uji mengalami keruntuhan (N),
(A) = luas penampang tekan (mm²).

Dengan luas bidang tekan sebesar 34.359 mm², perhitungan diterapkan pada seluruh benda uji.

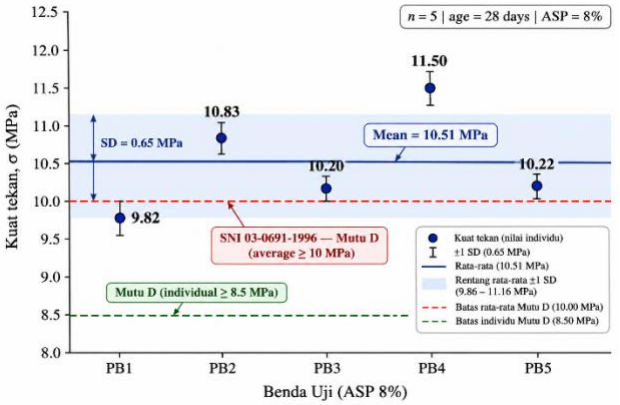
Tabel 1. Hasil Pengujian Kuat Tekan Paving Block ASP 8%

No	Sampel	Berat (g)	Luas (cm²)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)
1	PB 1	3.890	343,59	337,40	9,82
2	PB 2	3.930	343,59	372,10	10,83
3	PB 3	3.905	343,59	350,50	10,20
4	PB 4	3.960	343,59	395,10	11,50
5	PB 5	3.895	343,59	351,10	10,22
Rata-rata		3.916	343,59	361,24	10,51
Standar Deviasi		28,1	-	22,43	0,65

Sumber: Editor, 2026

Dengan demikian, variasi hasil pengujian relatif rendah. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh PB 4 sebesar 11,50 MPa, sedangkan terendah diperoleh PB 1 sebesar 9,82 MPa. Selisih keduanya sebesar 1,68 MPa.

Perbedaan antar benda uji dapat dipengaruhi oleh distribusi agregat, tingkat pemadatan, distribusi pasta semen, serta variasi lokal rongga pada beton berpori. Berbeda dengan beton padat, struktur *pervious concrete* sengaja mempertahankan rongga sehingga luas penampang efektif yang mentransfer beban tidak sepenuhnya berupa material padat. Oleh karena itu, pengendalian gradasi, pemadatan, dan pembentukan rongga menjadi faktor penting dalam memperoleh kuat tekan yang seragam.



Gambar 2. Perbandingan nilai kuat tekan benda uji ASP 8%
Sumber: Editor, 2026

Secara umum, hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan ASP 8% masih mampu menghasilkan paving block dengan kuat tekan rata-rata di atas 10 MPa pada umur 28 hari. Hal ini memberikan dasar mekanik yang cukup untuk melanjutkan pengembangan prototipe BIO-PIEZOBLOCK.

Evaluasi Mutu dan Pemilihan ASP 8%

Hasil kuat tekan selanjutnya dibandingkan dengan klasifikasi mutu paving block berdasarkan SNI 03-0691-1996. Berdasarkan parameter kuat tekan, nilai rata-rata 10,51 MPa dan nilai minimum 9,82 MPa telah melampaui persyaratan kuat tekan rata-rata dan minimum untuk Mutu D.

Tabel 2. Evaluasi Kuat Tekan terhadap Mutu Paving Block

No	Mutu	Rata-rata Minimum (MPa)	Individu Minimum(MPa)	Hasil BIO-Piezoblock
1	A	40	35	TM
2	B	230	17	TM
3	C	15	12,5	TM
4	D	10	8,5	M
5	BIO-Piezo	10,51	9,82	Mutu D

Sumber: Editor, 2026

Dengan demikian, berdasarkan parameter kuat tekan, paving block ASP 8% memenuhi kriteria Mutu D. Hasil ini belum dapat digunakan untuk menyatakan bahwa produk memenuhi seluruh persyaratan SNI karena parameter mutu lainnya, khususnya penyerapan air dan ketahanan aus, belum diuji dalam penelitian ini.

Pemilihan ASP 8% pada penelitian ini juga didukung oleh hasil penelitian terdahulu pada beton berpori yang menunjukkan bahwa kadar ASP rendah hingga menengah cenderung lebih sesuai untuk menjaga keseimbangan antara kekuatan dan karakteristik pori. Namun, kadar 8% tidak dapat dinyatakan sebagai batas maksimum universal karena kinerja ASP dipengaruhi oleh karakteristik abu, ukuran partikel, proses pembakaran, komposisi campuran, rasio air-semen, dan metode pemadatan.

Dalam konteks BIO-PIEZOBLOCK, kadar 8% dipilih sebagai kadar penelitian karena mempertimbangkan kebutuhan untuk mempertahankan kekuatan sekaligus menjaga struktur berpori. Nilai kuat tekan aktual sebesar 10,51 MPa menunjukkan bahwa komposisi tersebut masih menghasilkan kapasitas mekanik pada tingkat Mutu D berdasarkan parameter kuat tekan.

Temuan ini juga menunjukkan adanya kompromi antara dua karakteristik material. Peningkatan kepadatan material berpotensi meningkatkan kekuatan, tetapi dapat mengurangi volume rongga yang menjadi karakteristik utama paving block berpori. Sebaliknya, peningkatan rongga dapat mendukung fungsi pervious, tetapi berpotensi menurunkan kekuatan. Oleh karena itu, optimasi BIO-PIEZOBLOCK perlu diarahkan pada keseimbangan antara kinerja mekanik dan fungsi pori.

Integrasi, Respons dan Implikasi kinerja Piezoelektrik pada BIO-PIEZOBLOCK

Integrasi elemen piezoelektrik dilakukan pada prototipe paving block berpori hexagonal berbasis ASP 8%. Pada tahap eksperimen, digunakan variasi jumlah dan distribusi elemen piezoelektrik sebanyak 1, 2, 6, dan 24 elemen. Khusus konfigurasi 24 elemen, dilakukan perbandingan antara penempatan elemen secara tersebar dan penempatan secara terkonsentrasi pada zona yang menerima pembebanan injakan.



Gambar 3. Integrasi 24 elemen piezoelektrik
Sumber: Editor, 2026

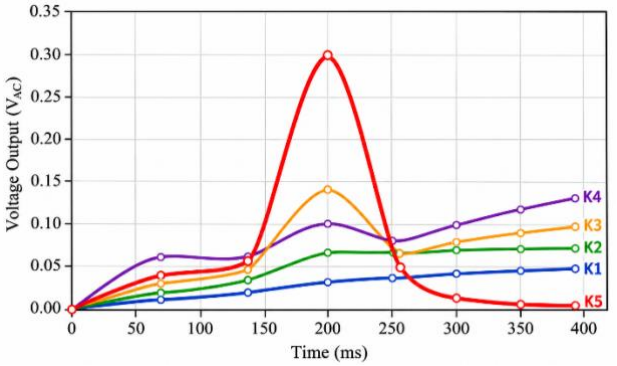
Foto pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa prototipe BIO-PIEZOBLOCK telah melalui tahapan fabrikasi dan perakitan fisik, ditandai dengan pemasangan elemen piezoelektrik, pengkabelan antar elemen, dan koneksi menuju rangkaian pengukuran. Dokumentasi ini menjadi bukti visual bahwa konsep yang dikembangkan tidak hanya berupa desain konseptual, tetapi telah direalisasikan dalam bentuk prototipe eksperimen.

Tabel 3. Variasi Konfigurasi dan Respons Piezoelektrik

Konfigurasi	Jumlah Piezo	Distribusi	Respons Tegangan AC	Interpretasi
K1	1	satu posisi	<0,05 V	sangat kecil
K2	2	satu zona	<0,05 V	kecil
K3	6	satu zona	<0,05 V	kecil
K4	24	tersebar	<0,05 V	kecil
K5	24	terkonsentrasi	0,10-0,30 V	respons terlihat

Sumber: Editor, 2026

Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa efektivitas transfer beban menuju elemen piezoelektrik merupakan faktor penting dalam menghasilkan respons listrik. Pada konfigurasi tersebar, tidak seluruh elemen berada pada zona yang mengalami deformasi secara efektif ketika injakan diberikan pada satu lokasi. Sebaliknya, konsentrasi 24 elemen pada zona pembebanan meningkatkan peluang beberapa elemen menerima deformasi secara bersamaan.



Gambar 4. Respons tegangan berdasarkan konfigurasi elemen
Sumber: Editor, 2026

Hasil tersebut menunjukkan bahwa strategi pengembangan BIO-PIEZOBLOCK tidak cukup dilakukan dengan meningkatkan jumlah elemen piezoelektrik, tetapi perlu mempertimbangkan lokasi, distribusi, dan mekanisme transfer beban. Temuan ini menjadi dasar penting untuk pengembangan desain selanjutnya karena konfigurasi elemen harus disesuaikan dengan pola pembebanan aktual pada permukaan paving.

Setelah melalui rangkaian konversi AC-DC, diperoleh keluaran DC yang teramati sekitar 0,1 V. Hasil tersebut menunjukkan adanya respons listrik setelah proses konversi, tetapi belum dapat digunakan untuk menyatakan besarnya daya atau energi yang dipanen. Pengukuran arus, resistansi beban, daya, energi per injakan, serta karakteristik keluaran terhadap variasi beban belum dilakukan secara kuantitatif pada tahap penelitian ini.

Dengan demikian, hasil piezoelektrik pada penelitian ini diposisikan sebagai respons listrik awal, bukan sebagai klaim kemampuan pengisian baterai atau penyediaan daya. Nilai 0,10–0,30 V AC menunjukkan bahwa integrasi piezoelektrik pada paving block berpori dapat menghasilkan respons terhadap pembebanan injakan, sedangkan konfigurasi terkonsentrasi menunjukkan respons yang lebih terlihat dibandingkan konfigurasi tersebar.

Jika dikaitkan dengan hasil kuat tekan sebelumnya, BIO-PIEZOBLOCK memiliki dua fungsi yang dikembangkan secara bersamaan, yaitu fungsi utama sebagai elemen perkerasan berpori dan fungsi tambahan sebagai media pemanfaatan respons mekanis menjadi respons listrik. Nilai kuat tekan rata-rata 10,51 ± 0,65 MPa memberikan dasar mekanik pada tingkat Mutu D berdasarkan parameter kuat tekan, sedangkan respons piezoelektrik 0,10–0,30 V AC pada konfigurasi 24 elemen terkonsentrasi menunjukkan potensi awal fungsi tambahan tersebut.

Konsep ini berpotensi diarahkan pada aplikasi dengan beban relatif ringan dan aktivitas pejalan kaki, seperti jalur pedestrian, ruang publik, taman, atau kawasan kampus. Namun, penerapan lapangan masih memerlukan pengujian lanjutan terhadap porositas, penyerapan air, laju infiltrasi, ketahanan aus,

durabilitas, serta karakteristik energi piezoelektrik secara terukur.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa ASP 8% dapat digunakan sebagai basis pengembangan paving block hexagonal berpori dengan kuat tekan rata-rata 10,51 MPa, sementara integrasi 24 elemen piezoelektrik yang dikonsentrasikan pada zona pembebanan menghasilkan respons listrik paling terlihat. Temuan tersebut memperlihatkan potensi BIO-PIEZOBLOCK sebagai konsep awal perkerasan multifungsi yang menggabungkan fungsi material perkerasan, pengelolaan air melalui struktur berpori, dan pemanfaatan respons mekanis akibat aktivitas manusia.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan menguji prototipe BIO-PIEZOBLOCK, yaitu paving block hexagonal berpori berbasis Abu Sekam Padi (ASP) 8% yang diintegrasikan dengan elemen piezoelektrik sebagai konsep awal perkerasan multifungsi. Hasil pengujian lima benda uji pada umur 28 hari menunjukkan kuat tekan sebesar 9,82–11,50 MPa dengan nilai rata-rata 10,51 ± 0,65 MPa, yang menunjukkan konsistensi hasil pengujian dan memenuhi kriteria kuat tekan yang digunakan sebagai acuan mutu paving block. Integrasi piezoelektrik dengan variasi 1, 2, 6, dan 24 elemen menunjukkan bahwa jumlah elemen tidak secara langsung menentukan besarnya respons listrik; konfigurasi 24 elemen yang terkonsentrasi pada zona injakan memberikan respons paling terlihat, yaitu sekitar 0,10–0,30 V AC, sedangkan konfigurasi dengan elemen yang lebih sedikit maupun 24 elemen yang tersebar menghasilkan respons relatif kecil. Hasil ini mengindikasikan bahwa efektivitas transfer beban dan distribusi elemen piezoelektrik merupakan faktor penting dalam pengembangan sistem pemanenan energi berbasis injakan. Secara keseluruhan, BIO-PIEZOBLOCK menunjukkan potensi sebagai inovasi perkerasan berpori yang menggabungkan fungsi elemen perkerasan dan respons piezoelektrik, khususnya untuk aplikasi pada area pejalan kaki dan ruang publik, meskipun pengembangan lebih lanjut masih diperlukan melalui pengujian porositas, infiltrasi, durabilitas, arus, daya, dan energi listrik untuk memperoleh evaluasi kinerja multifungsi yang lebih komprehensif.

REFERENSI

Badan Standardisasi Nasional. (1996). *SNI 03-0691-1996: Bata beton (paving block).* Badan Standardisasi Nasional.

De Silva, G. H. M. J. S., & Priyamali, M. W. S. (2022). Potential use of waste rice husk ash for concrete paving blocks: Strength, durability, and run-off properties. *International Journal of Pavement Engineering, 23*(7), 2265–2277. https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1851029

Gaber, H., & AbdelRaheem, M. (2025). Piezoelectric energy harvesting from roadways: Challenges, advances, and future directions. *Transportation Research Record, 2679*(12), 760–779. https://doi.org/10.1177/03611981251353705

Hesami, S., Ahmadi, S., & Nematzadeh, M. (2014). Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials, 53*, 680–691. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070

International Electrotechnical Commission. (2025). *IEC 63150-3:2025: Semiconductor devices—Measurement and evaluation methods of kinetic energy harvesting devices under practical vibration environment—Part 3: Human foot impact motion.* International Electrotechnical Commission.

Johan, S. S., Ku Muhsen, K. N. D., Ghazaly, Z. M., & Ghazaly, M. M. (2025). The sustainability of piezoelectric device compatible with interlocking concrete pavement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1548*(1), 012005. https://doi.org/10.1088/17551315/1548/1/012005

Khankhaje, E., Jang, H., Kim, J., & Rafieizonooz, M. (2025). Utilizing rice husk ash as cement replacement in pervious concrete: A review. *Developments in the Built Environment, 22*, 100675. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100675

Li, C., Zhao, H., Tian, Y., & Lin, Z. (2022). Experimental investigation of piezoelectric energy harvesters applied in concrete pavement. *Transportation Research Record, 2676*(6), 25–34. https://doi.org/10.1177/03611981211069943

Mou, K., Ji, X., Liu, J., Zhou, H., Tian, H., Li, X., & Liu, H. (2025). Using piezoelectric technology to harvest energy from pavement: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 12*(1), 68–86. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.11.002

Song, G. J., Cho, J. Y., Kim, K.-B., Ahn, J. H., Song, Y., Hwang, W., Hong, S. D., & Sung, T. H. (2019). Development of a pavement block piezoelectric energy harvester for self-powered walkway applications. *Applied Energy, 256*, 113916. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113916

Subramaniam, D. N., & Sathiparan, N. (2023). Comparative study of fly ash and rice husk ash as cement replacement in pervious concrete: Mechanical characteristics and sustainability analysis. *International Journal of Pavement Engineering, 24*(2), 2075867. https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2075867