

STUDI AWAL PERMEABILITAS DAN KUAT TEKAN BETON BERPORI RAMAH LINGKUNGAN DENGAN PEMANFAATAN LIMBAH INDUSTRI

Hanyta Khairunnisa¹, Suhaimi², *Ammar Fadhil³, RDI Kurnia⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Almuslim, Bireuen, Aceh, Indonesia

^{*)} Email : ammarfadhil@umuslim.ac.id

Received: 12 November 2025 ; Revised: 17 November 2025 ; Accepted: 19 November 2025

ABSTRACT

The increasing generation of industrial waste and the growing demand for sustainable construction materials have driven the development of pervious concrete as an environmentally friendly pavement material. Pervious concrete possesses high drainage capability, effectively reducing surface runoff and enhancing groundwater infiltration. This study evaluates the effect of High-Density Polyethylene (HDPE) waste as a partial replacement for coarse aggregate on the compressive strength, density, porosity, and permeability of pervious concrete using split and gravel aggregates at a water–cement ratio (w/c) of 0.40. HDPE was incorporated at 0%, 5%, 10%, and 15% by weight of coarse aggregate, and testing was conducted at 28 days. The results show that compressive strength decreased from 16.75 MPa to 10.32 MPa for gravel and from 18.92 MPa to 15.41 MPa for split aggregate. Density declined from approximately 2100 kg/m³ to about 1850 kg/m³ with increasing HDPE content. Conversely, porosity increased from 30–32% to 37–38%, while permeability rose from approximately 29–35 mm/s to 44–46 mm/s. A strong correlation ($R^2 > 0.80$) was found between porosity and permeability, indicating that hydraulic performance is predominantly governed by the interconnected pore structure induced by HDPE modification. Overall, a 5% HDPE substitution achieved the best balance between structural strength and drainage performance without significant strength loss, supporting the implementation of green infrastructure principles in sustainable pavement systems, whereas HDPE contents above 10% were mechanically inefficient.

Keywords: Porous concrete, HDPE, compressive strength, porosity, permeability

ABSTRAK

Peningkatan timbunan limbah industri serta kebutuhan material konstruksi yang berkelanjutan telah mendorong pengembangan beton berpori sebagai material perkerasan yang ramah lingkungan. Beton berpori memiliki kemampuan drainase yang tinggi sehingga mampu mengurangi limpasan permukaan dan mendukung infiltrasi air tanah. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh limbah High Density Polyethylene (HDPE) sebagai substitusi parsial agregat kasar terhadap kuat tekan, densitas, porositas, dan permeabilitas beton berpori dengan menggunakan agregat split dan kerikil pada rasio air–semen (w/c) 0,40. Variasi HDPE digunakan sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat agregat kasar, dan pengujian dilakukan pada umur 28 hari. Hasil menunjukkan bahwa kuat tekan menurun dari 16,75 MPa menjadi 10,32 MPa untuk kerikil dan dari 18,92 MPa menjadi 15,41 MPa untuk split. Densitas turun dari ± 2100 kg/m³ menjadi ± 1850 kg/m³ seiring bertambahnya HDPE. Sebaliknya, porositas meningkat dari 30–32% menjadi 37–38% dan permeabilitas meningkat dari ± 29 –35 mm/s menjadi ± 44 –46 mm/s. Korelasi yang sangat kuat ($R^2 > 0,80$) ditemukan antara porositas dan permeabilitas, yang menunjukkan bahwa kinerja hidrolis terutama dikendalikan oleh struktur rongga terbuka akibat modifikasi HDPE. Secara keseluruhan, kadar HDPE sebesar 5% memiliki keseimbangan terbaik antara kekuatan struktural dan kinerja drainase tanpa menurunkan kekuatan secara signifikan, sekaligus mendukung penerapan konsep infrastruktur hijau (green infrastructure) dalam sistem perkerasan berkelanjutan sedangkan kadar >10% menjadi tidak efisien secara mekanis.

Kata kunci: Beton berpori, HDPE, kuat tekan, porositas, permeabilitas

1. PENDAHULUAN

Beton berpori merupakan salah satu material konstruksi inovatif yang dirancang untuk memiliki tingkat permeabilitas tinggi sekaligus kemampuan drainase yang baik. Material ini banyak diaplikasikan pada area parkir, trotoar, jalan lingkungan, hingga ruang terbuka hijau, karena kemampuannya dalam mengurangi limpasan air hujan dan meningkatkan infiltrasi ke dalam tanah [1]. Keunggulan tersebut menjadikan beton berpori relevan dengan konsep pembangunan infrastruktur berkelanjutan yang mendukung pengendalian banjir, konservasi air tanah, serta penerapan *green construction* [2]/[3]. Meskipun memiliki kelebihan pada aspek hidrologis, beton berpori masih menghadapi kelemahan pada sifat mekanis, terutama kuat tekan yang relatif lebih rendah dibandingkan beton konvensional [4]. Kondisi ini membatasi penggunaannya pada aplikasi struktural dengan beban tinggi. Oleh karena itu, diperlukan inovasi melalui pemanfaatan material alternatif yang mampu meningkatkan performa beton berpori tanpa mengurangi sifat permeabilitasnya [5][6].

Salah satu pendekatan yang banyak diteliti adalah pemanfaatan limbah industri sebagai substitusi agregat [7]. Limbah plastik jenis *High Density Polyethylene* (HDPE) memiliki potensi besar karena ketersediaannya yang

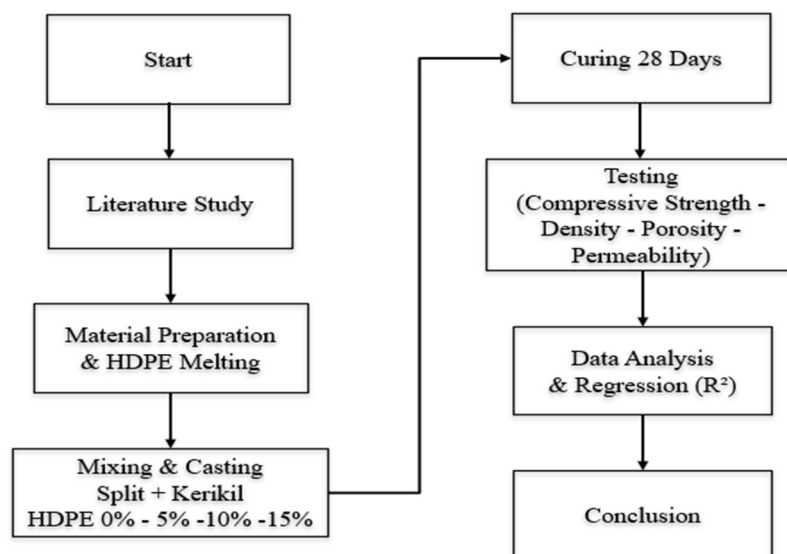
melimpah, sulit terurai secara alami dan berdampak negatif terhadap lingkungan bila tidak dikelola dengan baik [8]. Pemanfaatan HDPE dalam campuran beton berpori diharapkan dapat memberikan dua manfaat sekaligus, yaitu mengurangi pencemaran lingkungan serta menghasilkan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan [9]. Jenis dan bentuk agregat memegang peran penting dalam menentukan sifat fisik dan mekanik beton pori. Agregat split umumnya memiliki bentuk lebih kasar dan bersudut tajam, yang meningkatkan ikatan antarpartikel serta menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Sebaliknya, agregat kerikil alami memiliki permukaan lebih halus dan bentuk bulat, yang dapat meningkatkan konektivitas pori dan permeabilitas tetapi menurunkan kekuatan tekan. Variasi bentuk agregat dapat mengubah densitas beton pori hingga 12%, sementara melaporkan bahwa peningkatan kekasaran agregat dapat memperbaiki *interfacial transition zone* antara pasta semen dan agregat [10].

Keterkaitan parameter kuat tekan, densitas, porositas, dan permeabilitas saling berkaitan erat dalam menentukan performa beton pori. Hubungan antara porositas dan kuat tekan bersifat negatif eksponensial, sedangkan hubungan antara porositas dan permeabilitas bersifat positif linier [11]. Kenaikan porositas meningkatkan jumlah dan ukuran saluran air, sehingga menaikkan permeabilitas namun melemahkan struktur mekanik beton. Penelitian juga menegaskan bahwa rasio air semen (FAS), bentuk agregat dan distribusi ukuran partikel sangat memengaruhi kedua sifat tersebut [12].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan limbah plastik pada beton berpori dapat memengaruhi distribusi pori, kekuatan mekanis, serta permeabilitasnya [13]. Namun demikian, belum banyak kajian yang secara komprehensif menilai pengaruh variasi kadar substitusi HDPE terhadap hubungan kuat tekan (f'_c) dengan permeabilitas beton berpori, baik dengan agregat kerikil maupun split. Analisis kuantitatif seperti regresi linear diperlukan untuk mengetahui sejauh mana substitusi HDPE memengaruhi tren penurunan kekuatan mekanis serta konsistensinya [14]. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kadar HDPE (0%, 5%, 10%, dan 15%) terhadap sifat mekanik dan hidrolis beton pori, dengan membandingkan dua jenis agregat, yaitu split dan kerikil, pada rasio airsemen (FAS) 0,40. Fokus utama penelitian ini adalah untuk mengetahui hubungan antara kuat tekan (f'_c), porositas, dan permeabilitas serta menentukan kadar optimum HDPE yang mampu mempertahankan keseimbangan antara kekuatan dan kemampuan drainase. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam menjelaskan perubahan perilaku mekanis–hidrolis akibat modifikasi agregat dengan limbah HDPE [15], [16].

2. METODE PENELITIAN

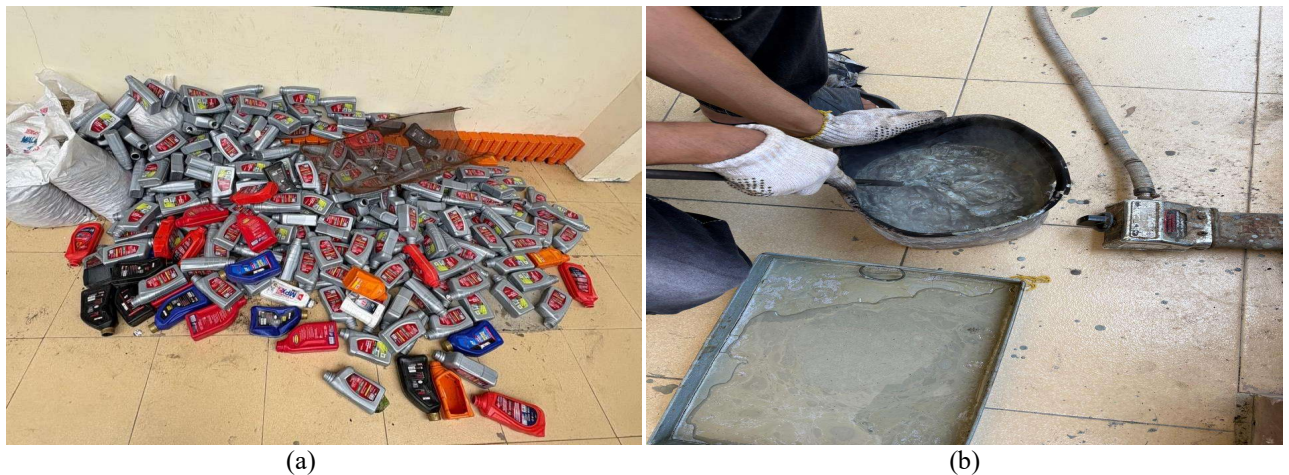
Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Bahan dan Struktur, Program Studi Teknik Sipil Universitas Almuslim. Tujuan utama penelitian adalah untuk menganalisis pengaruh variasi kadar limbah plastik High-Density Polyethylene (HDPE) terhadap sifat mekanik dan hidrolis beton pori dengan dua jenis agregat, yaitu split dan kerikil, pada rasio air-semen (FAS) sebesar 0,40. Variasi kadar HDPE yang digunakan adalah 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat agregat kasar. Penelitian difokuskan pada pengujian kuat tekan (f'_c), porositas, dan permeabilitas, serta analisis hubungan antarvariabel menggunakan pendekatan regresi linear untuk menentukan tren pengaruh HDPE terhadap kinerja beton pori dan gambar dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Alat dan Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen Portland tipe I merek Gresik dengan berat jenis $3,15 \text{ g/cm}^3$, agregat kasar jenis split dan kerikil alami yang lolos saringan 19 mm dan tertahan saringan 9,5 mm, serta air bersih yang memenuhi ketentuan SNI 03-2847-2019 tentang persyaratan air untuk beton. Selain itu, bahan tambahan yang digunakan adalah limbah botol oli bekas berbahan High-Density Polyethylene (HDPE) yang berfungsi sebagai pengganti sebagian agregat kasar [17]. Limbah HDPE diolah terlebih dahulu sebelum digunakan dalam campuran beton. Tahapan pengolahan dilakukan melalui metode peleburan (*melting process*). Botol HDPE dicuci menggunakan larutan deterjen untuk menghilangkan sisa oli dan kotoran, kemudian dikeringkan hingga bebas air. Setelah bersih, botol dipotong menjadi potongan kecil berukuran $\pm 1-3 \text{ cm}^2$ dan dimasukkan ke dalam wadah logam tahan panas. Proses peleburan dilakukan pada suhu $160-180^\circ\text{C}$ hingga plastik meleleh sempurna tanpa mengalami degradasi termal. Lelehan HDPE kemudian dituangkan ke dalam cetakan logam berbentuk balok kecil (ukuran 5–10 mm) dan didiamkan hingga mengeras kembali pada suhu ruang. Setelah padat, hasil cetakan dipotong menjadi ukuran agregat kasar yang seragam dan disimpan dalam wadah tertutup pada kondisi kering, dapat dilihat seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Limbah botol oli berbahan HDPE sebagai bahan substitusi agregat kasar (a), proses peleburan HDPE hingga mencapai kondisi cair sebelum dilakukan pencetakan menjadi agregat HDPE (b).

Agregat HDPE hasil peleburan memiliki tekstur keras, permukaan licin, dan sifat hidrofobik, sehingga mampu berfungsi sebagai pengganti parsial agregat split atau kerikil dalam campuran beton pori. Sifat ringan dan tidak menyerap air dari HDPE berpotensi menurunkan berat jenis beton dan meningkatkan konektivitas pori, seperti ditampilkan pada Gambar 3. Proses penelitian ini juga menggunakan beberapa peralatan utama seperti timbangan digital presisi ($\pm 0,01 \text{ g}$) untuk menimbang bahan, mesin pengaduk beton (*mixer drum*) untuk memastikan homogenitas campuran, cetakan silinder $\text{Ø}10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ untuk pembuatan benda uji, serta *Compression Testing Machine* (CTM) untuk pengujian kuat tekan. Selain itu, digunakan oven pengering, permeameter tipe *Falling Head*, alat ukur air, dan peralatan bantu laboratorium seperti ember, saringan, serta wadah logam tahan panas untuk proses peleburan HDPE. Seluruh material dan alat uji dikondisikan pada suhu ruang $25-27^\circ\text{C}$ guna menjaga kestabilan kadar air dan berat jenis sebelum proses pencampuran beton. Kondisi lingkungan yang terkontrol ini bertujuan untuk meminimalkan variasi hasil uji akibat pengaruh suhu dan kelembaban, sehingga data yang diperoleh lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah [18].



Gambar 3. Hasil pencetakan dan pemotongan HDPE yang telah mengalami proses peleburan (a), serta pecahan agregat HDPE yang digunakan sebagai substitusi agregat kasar pada campuran beton berpori (b).

Metode Pengujian Sifat Fisis Agregat

Pengujian analisis saringan dilakukan untuk menentukan distribusi ukuran butiran agregat agar memenuhi spesifikasi beton pori, yaitu lolos saringan 19 mm dan tertahan saringan 9,5 mm. Berat jenis dan penyerapan air diukur untuk mengetahui densitas agregat serta kemampuan menyerap air yang memengaruhi kebutuhan air dalam campuran. Berat isi agregat dihitung untuk menentukan proporsi campuran volumetrik beton. Sedangkan kadar lumpur dan kadar air diuji untuk memastikan kebersihan agregat dari partikel halus yang dapat mengganggu ikatan antara pasta semen dan agregat. Mengacu pada standar SNI 03-1969-2016 dan SNI 03-4804-1998. Parameter yang diuji meliputi analisis saringan (gradasi), berat jenis dan penyerapan air, berat isi agregat (bulk density), serta kadar lumpur dan kadar air [19].

Metode Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton pori dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan beban tekan maksimum hingga mengalami keruntuhan. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari menggunakan Mesin Uji Tekan (*Compression Testing Machine*) berkapasitas 1000 kN, sesuai dengan ketentuan SNI 1974:2011 – Cara Uji Kuat Tekan Beton Silinder. Benda uji berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm yang telah melalui proses perawatan (*curing*) selama 28 hari dalam kondisi lembab. Sebelum pengujian, permukaan benda uji dibersihkan dan diratakan agar distribusi beban merata saat ditekan. Setiap benda uji diletakkan secara tegak lurus pada plat bawah mesin, kemudian beban diberikan secara bertahap dengan laju penambahan beban konstan hingga benda



uji hancur, dapat dilihat pada Gambar 4 [20].

(Sumber: Peneliti, 2025)

Gambar 4 . Compression Testing Machine (CTM)

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana: f'_c adalah kuat tekan beton (MPa), P adalah beban maksimum yang diterima benda uji (N), dan A adalah luas penampang silinder (mm^2).

Metode Pengujian Porositas

Pengujian porositas dilakukan untuk mengetahui volume rongga udara yang terbentuk di dalam beton pori, yang berperan penting dalam menentukan kemampuan drainase dan permeabilitas beton. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan ASTM C642-13 – Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Benda uji berbentuk silinder ($\text{Ø}10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) yang telah mencapai umur 28 hari dikeringkan dalam oven pada suhu $105 \pm 5^\circ\text{C}$ hingga beratnya konstan, kemudian didinginkan dan ditimbang sebagai berat kering (W_1). Selanjutnya, benda uji direndam dalam air selama 24 jam hingga mencapai kondisi jenuh, lalu ditimbang kembali dalam kondisi jenuh permukaan kering (W_2) dan dalam air (W_3) [21].

$$\text{Porositas}(\%) = \frac{(W_2 - W_1)}{(W_2)} \times 100 \quad (2)$$

dengan: W_1 = berat benda uji dalam kondisi kering oven (g), W_2 = berat benda uji dalam kondisi jenuh permukaan kering (SSD) (g) dan W_3 = berat benda uji dalam kondisi terendam air (g)

Metode Pengujian Permeabilitas Beton Pori

Pengujian permeabilitas beton pori dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton dalam mengalirkan air melalui pori-pori yang saling terhubung. Pengujian ini menggunakan alat Falling Head Permeameter, mengacu pada ASTM C1701/C1701M-17a – Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. Benda uji berbentuk silinder ($\varnothing 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) yang telah mencapai umur 28 hari ditempatkan secara vertikal pada alat permeameter. Proses pengujian dilakukan dengan mengalirkan air dari tabung ukur bergradasi tertentu ke permukaan beton, dan waktu aliran air yang menembus benda uji dicatat dengan stopwatch [22].

$$k = \frac{aL}{At} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3)$$

di mana: k = koefisien permeabilitas (mm/s), a = luas penampang pipa air (mm²), L = tinggi benda uji (mm), A = luas penampang beton (mm²), t = waktu aliran air (s), h_1 dan h_2 = tinggi muka air awal dan akhir (mm).

Rancangan Benda Uji

Benda uji dibuat berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dengan volume 0,0053 m³. Setiap variasi campuran dibuat tiga sampel ulangan. Total 72 Benda uji serta dilakukan perawatan dengan cara perendaman dalam air selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian mekanis [21]. Menentukan rancangan campuran menggunakan metode ACI untuk beton berpori dengan FAS 0.40. Menentukan variasi substitusi HDPE sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat agregat kasar. Membagi campuran berdasarkan jenis agregat (kerikil dan split) dengan komposisi material untuk tiap variasi dihitung berdasarkan volume total benda uji dan ditampilkan pada Tabel 1. Seluruh benda uji diuji pada umur 28 hari untuk parameter kuat tekan, densitas, porositas, dan permeabilitas menggunakan CTM, pengukuran massa-volume, metode void content, dan Falling Head Permeameter [22].

Tabel.1 Rekapitulasi Komposisi Campuran Beton Berpori FAS 0,40 Variasi HDPE (per benda uji)

Variasi HDPE	Air (kg)	Semen (kg)	Agregat Kerikil (kg)	Agregat Split (kg)	HDPE (kg)
0%	8,91	22,27	83,09	83,09	0
5%	8,91	22,27	78,94	78,94	4,15
10%	7,92	19,8	74,78	74,78	8,31
15%	7,92	19,8	70,63	70,63	12,46



(Sumber: Peneliti,

2025)

Gambar 5. Benda uji beton berpori bentuk silinder dan benda uji setelah berumur 28 hari

Analisa Data

Data hasil pengujian berat, kuat tekan, densitas, porositas, dan permeabilitas beton berpori dengan substitusi limbah HDPE dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif dan regresi polinomial orde dua. Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh peningkatan kadar HDPE terhadap perubahan sifat fisis dan mekanik beton,

serta hubungan antarparameter seperti densitas–kuat tekan, porositas–kuat tekan, dan porositas–permeabilitas pada masing-masing jenis agregat, yaitu kerikil dan split. Nilai koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk mengevaluasi tingkat keeratan hubungan antarvariabel. Regresi polinomial digunakan karena pola data menunjukkan tren non-linier akibat pengaruh kombinasi perubahan massa jenis, distribusi rongga, dan tingkat ikatan antarpartikel. Berdasarkan hasil analisis, kadar HDPE optimum ditentukan dari keseimbangan antara kekuatan struktural (kuat tekan dan densitas) dengan kinerja drainase (porositas dan permeabilitas) [23], [24].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemeriksaan Sifat Fisis Agregat

Hasil pemeriksaan sifat fisis agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 2. Agregat yang digunakan terdiri dari dua jenis, yaitu kerikil alami dan split hasil pemecah batu, yang keduanya memenuhi standar kualitas agregat kasar untuk beton menurut SNI 03-2461-2002 [25].

Tabel 2. Pemeriksaan Sifat Fisis Agregat Kerikil dan Split

Jenis Pemeriksaan	Agregat Kerikil	Agregat Split
Analisis Saringan (FM)	7,716	6,603
Berat Volume (kg/l)	1,593	1,569
Berat Jenis SSD	2,656	2,636
Berat Jenis Kering (OD)	2,603	2,579
Penyerapan Air (%)	2,029	2,221

(Sumber: Peneliti, 2025)

Hasil pemeriksaan pada tabel 2 menunjukkan bahwa agregat kerikil memiliki modulus kehalusan (FM) sebesar 7,716 yang menandakan gradasi lebih kasar dibandingkan agregat split dengan FM 6,603. Berat volume kerikil sebesar 1,593 kg/l sedikit lebih tinggi dibanding split yaitu 1,569 kg/l, sehingga kerikil lebih padat. Berat jenis SSD kerikil 2,656 juga lebih tinggi dibanding split 2,636, yang berarti kerikil lebih memberikan kontribusi terhadap kepadatan beton. Namun, split memiliki penyerapan air sedikit lebih besar 2,221% dibanding kerikil 2,029%, yang menandakan split lebih porous. Secara keseluruhan, kedua agregat memenuhi syarat sebagai agregat kasar dalam campuran beton berpori, dengan perbedaan karakteristik yang dapat mempengaruhi performa kuat tekan dengan substitusi HDPE.

Pengujian Beton Berpori Agregat Kerikil dan Split dengan Substitusi Limbah HDPE

Rekapitulasi hasil nilai rata-rata pengujian yang disajikan pada Tabel 3, penambahan limbah plastik HDPE ke dalam campuran beton berpori menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap sifat fisis dan mekanik material. Peningkatan kadar HDPE menyebabkan penurunan berat dan densitas, serta peningkatan porositas dan permeabilitas. Pada agregat kerikil, berat turun dari 12,203 kg menjadi 11,483 kg dan densitas dari 2054,7 kg/m³ menjadi 1997,0 kg/m³, sedangkan pada split dari 10,943 kg menjadi 9,952 kg dan densitas dari 2064,7 kg/m³ menjadi 2010,0 kg/m³. Nilai kuat tekan juga menurun seiring bertambahnya kadar HDPE. Beton kerikil mengalami penurunan dari 16,728 MPa menjadi 10,139 MPa ($\approx 39\%$), sedangkan beton split dari 18,999 MPa menjadi 15,376 MPa ($\approx 19\%$). Agregat split menghasilkan kekuatan lebih tinggi karena bentuknya yang bersudut meningkatkan interlocking dan ikatan dengan pasta semen, sedangkan kerikil yang lebih bulat cenderung membentuk zona kontak lemah.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Pengujian Beton Berpori Agregat Kerikil dan Split dengan Substitusi Limbah HDPE

Kode	Substitusi HDPE	FAS	Berat (kg)	Kuat Tekan (MPa)	Densitas (Kg/m ³)	Porositas (%)	Permeabilitas (mm/s)
Kerikil	0%	0,40	12,203	16,728	2054,70	33,547	40,100
Kerikil	5%	0,40	11,534	15,865	2030,30	33,033	34,400
Kerikil	10%	0,40	11,521	14,239	2007,70	33,900	35,633
Kerikil	15%	0,40	11,483	10,139	1997,02	34,533	36,900
Split	0%	0,40	10,943	18,999	2064,67	33,947	35,900
Split	5%	0,40	10,874	18,171	2028,33	34,833	40,867
Split	10%	0,40	10,437	16,684	2023,33	35,800	41,667
Split	15%	0,40	9,952	15,376	2010,01	35,667	44,233

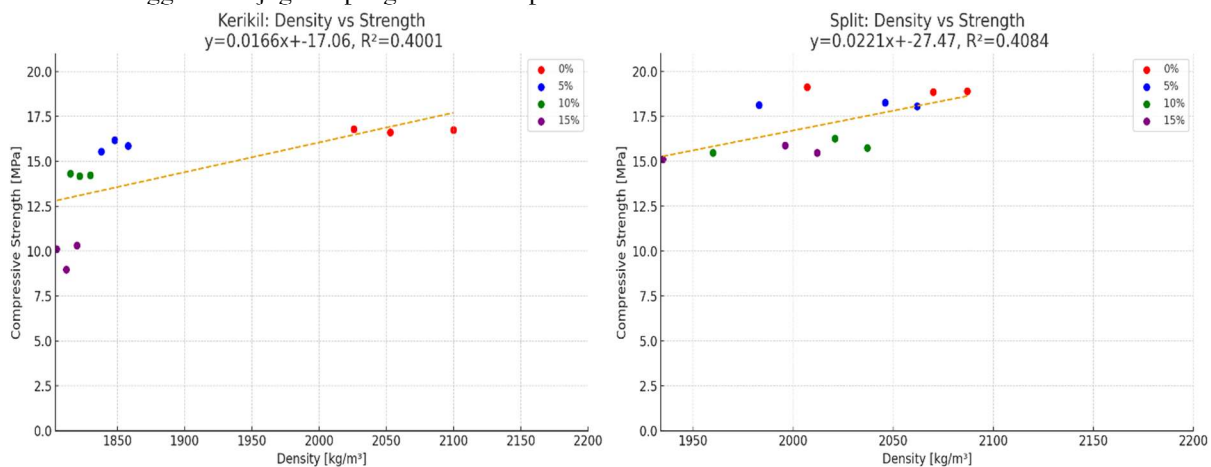
(Sumber: Peneliti, 2025)

Sebaliknya, porositas dan permeabilitas meningkat pada kedua sistem. Kenaikan ini menunjukkan bertambahnya volume rongga terbuka akibat partikel HDPE yang bersifat ringan dan tidak reaktif. Kondisi tersebut memperbaiki kemampuan drainase tetapi menurunkan kekuatan struktural. Secara keseluruhan, beton berpori dengan agregat split memberikan kombinasi terbaik antara kekuatan dan permeabilitas. Substitusi HDPE optimum

direkomendasikan $\leq 5\%$, karena pada kadar ini beton masih mempertahankan kuat tekan di atas 15 MPa dengan densitas stabil serta kinerja hidrolik yang baik.

Hubungan Antara Kuat Tekan dan Densitas

Hasil hubungan antara densitas dan kuat tekan beton berpori dengan substitusi limbah HDPE ditunjukkan pada Gambar 1 menunjukkan bahwa peningkatan kadar HDPE mengakibatkan penurunan kuat tekan beton berpori untuk kedua jenis agregat (split dan kerikil). Penurunan ini berkaitan erat dengan nilai densitas beton, di mana campuran dengan densitas lebih rendah cenderung menghasilkan kuat tekan yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan adanya hubungan positif antara densitas dan kuat tekan, di mana semakin padat struktur beton, semakin besar pula kemampuan material dalam menahan beban tekan. Pada beton berpori dengan agregat kerikil, hubungan kuat tekan densitas mengikuti tren linier dengan kontribusi sedang ($R^2 \approx 0,4001$). Rentang densitas 1850–2050 kg/m^3 meningkatkan kuat tekan dari sekitar 10 MPa menjadi ± 17 MPa. Meskipun hubungan ini positif, penyebaran data yang cukup lebar mengindikasikan bahwa faktor lain seperti bentuk butiran kerikil yang membulat (rounded) dan distribusi rongga udara juga berpengaruh terhadap kekuatan beton.



Sumber: Peneliti, 2025

Gambar 1. Hubungan antara Kuat Tekan dan Densitas Beton Berpori dengan (FAS 0,40)

Agregat split menunjukkan hubungan yang sedikit lebih kuat ($R^2 \approx 0,4084$) rentang densitas 1950–2100 kg/m^3 , kuat tekan beton berpori dengan agregat split dapat meningkat dari 10 MPa menjadi hampir 19 MPa, karena bentuk butirannya yang bersudut tajam memberikan interlocking lebih baik dibandingkan kerikil yang berbentuk bulat. Kondisi ini menghasilkan bidang kontak yang lebih luas dan ikatan antarpartikel yang lebih kuat sehingga kuat tekan meningkat lebih signifikan.

Secara mekanistik, penambahan HDPE menyebabkan turunnya densitas dan kuat tekan karena sifat fisik kimia HDPE yang berbeda dengan agregat mineral. HDPE memiliki densitas jauh lebih rendah dan permukaan hidrofobik yang tidak mampu membentuk ikatan kuat dengan pasta semen. Kondisi ini menciptakan rongga mikro di sekitar partikel HDPE (*microvoid zone*), mengurangi volume padat yang efektif, serta menurunkan luas bidang penyalur tegangan ketika beton menerima beban. Hasil ini sejalan dengan teori struktur beton berpori yang menyatakan bahwa densitas berbanding lurus dengan kemampuan beton menahan beban, di mana semakin padat strukturnya, maka semakin tinggi nilai kuat tekan yang diperoleh [26].

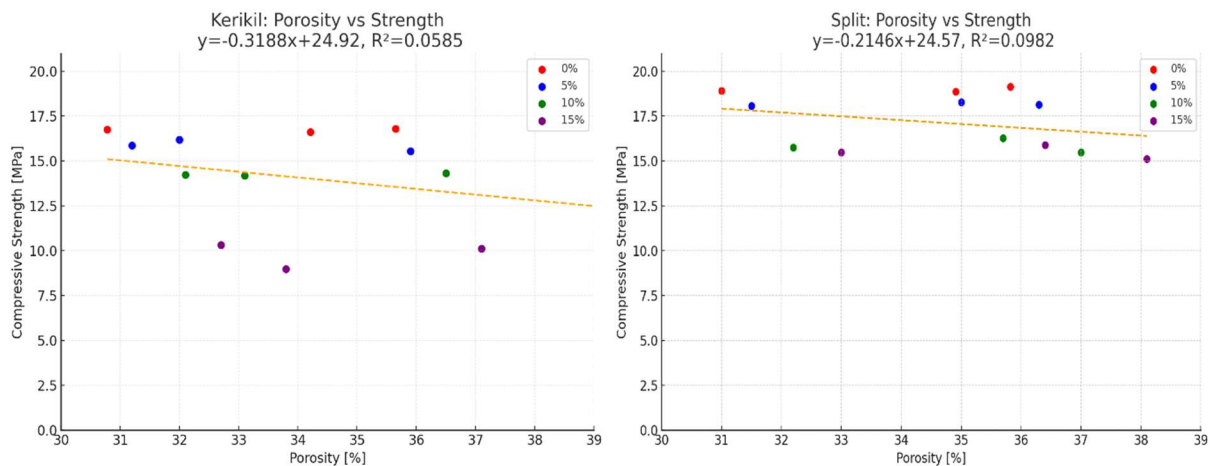
Hubungan Antara Kuat Tekan dan Porositas

Hubungan antara porositas dan kuat tekan beton berpori dengan substitusi limbah HDPE pada dua jenis agregat, yaitu split dan kerikil, menunjukkan pola yang konsisten, yaitu hubungan negatif. Peningkatan porositas menyebabkan penurunan kuat tekan, yang mengindikasikan bahwa semakin besar volume rongga udara di dalam beton, semakin rendah kemampuan material dalam menahan beban tekan. Kondisi ini sejalan dengan konsep dasar beton berpori, di mana rongga udara yang tinggi mengurangi integritas struktural dan luas bidang kontak antarpartikel.

Pada beton berpori dengan agregat split, persamaan regresi linear yang diperoleh adalah $y = -0,2146x + 24,57$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,0982$. Nilai R^2 yang rendah menunjukkan bahwa variasi kuat tekan tidak sepenuhnya dijelaskan oleh porositas, kemungkinan akibat distribusi rongga yang tidak merata dan perbedaan bentuk agregat. Walaupun demikian, tren umum tetap menunjukkan penurunan kuat tekan dari sekitar 19 MPa menjadi 15 MPa seiring peningkatan porositas dari 31% menjadi 38%. Penurunan ini terjadi karena bertambahnya

volume void yang tidak terisi pasta semen, sehingga berkurang luas bidang kontak antarbutir yang diperlukan untuk mentransfer tegangan.

Untuk beton berpori dengan agregat kerikil, diperoleh persamaan regresi $y = -0,3188x + 24,92$ dengan $R^2 = 0,0585$, yang lebih rendah dibandingkan agregat split. Nilai R^2 yang kecil mencerminkan bahwa pengaruh porositas terhadap kuat tekan pada beton kerikil lebih dipengaruhi oleh faktor-faktor lain, terutama bentuk agregat kerikil yang bulat. Bentuk ini menyebabkan interlocking yang kurang baik dan menghasilkan struktur internal yang kurang stabil. Peningkatan porositas dari 31% menjadi 37% menurunkan kuat tekan dari sekitar 17 MPa menjadi ± 10 MPa, yang menunjukkan bahwa performa mekanik beton kerikil lebih sensitif terhadap perubahan porositas dibandingkan beton split, dapat dilihat seperti pada Gambar 2.



Sumber: Peneliti, 2025

Gambar 2. Hubungan antara Kuat Tekan dan Porositas Beton Pori dengan Agregat Split (FAS 0,40)

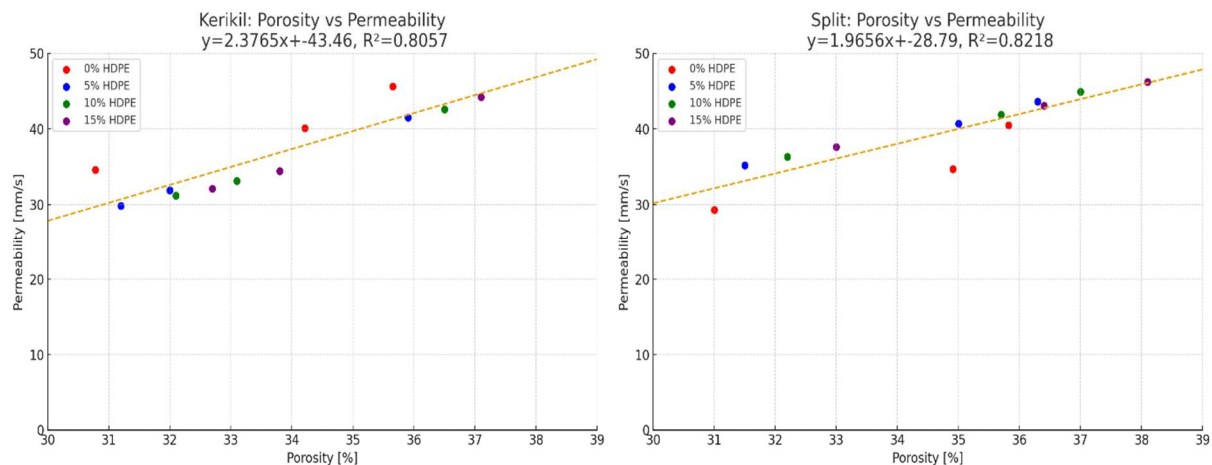
Secara keseluruhan, hubungan negatif antara porositas dan kuat tekan pada kedua jenis agregat mengonfirmasi bahwa porositas merupakan parameter destruktif bagi kinerja mekanik beton berpori. Rongga udara yang berlebihan melemahkan matriks dan mengurangi kualitas ikatan antarpartikel agregat dengan pasta semen. Meskipun demikian, beton dengan agregat split tetap menunjukkan kuat tekan yang lebih tinggi pada tingkat porositas yang sama dibandingkan agregat kerikil, sehingga agregat split lebih direkomendasikan untuk menghasilkan beton berpori yang mampu menjaga keseimbangan antara kekuatan mekanik dan kemampuan drainase.

Secara mikrostruktural, penambahan HDPE berkontribusi pada peningkatan porositas karena HDPE memiliki adhesi rendah terhadap pasta semen. Permukaan HDPE yang hidrofobik menciptakan zona rongga mikro (microvoid) di sekitar partikel HDPE. Rongga-rongga ini dapat saling terhubung dan berperan sebagai jalur penurunan kapasitas tekan, sehingga kuat tekan menurun secara bertahap seiring meningkatnya kadar HDPE. Hasil ini konsisten dengan berbagai studi sebelumnya yang menyatakan bahwa porositas merupakan indikator penting dalam menentukan perilaku mekanik beton berpori [27].

Hubungan Antara Permeabilitas dan Porositas

Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan positif yang kuat antara porositas dan permeabilitas beton berpori pada kedua jenis agregat, yaitu kerikil dan split. Peningkatan nilai porositas diikuti oleh meningkatnya kemampuan beton dalam meloloskan air, yang mengindikasikan bahwa sistem pori yang semakin terbuka berperan langsung terhadap peningkatan laju infiltrasi. Pada beton berpori dengan agregat kerikil, hubungan porositas–permeabilitas mengikuti persamaan regresi $y = 2,3765x + 43,46$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,8057$. Nilai R^2 yang tinggi ini menunjukkan bahwa sebesar 80,57% variasi permeabilitas dapat dijelaskan oleh perubahan porositas. Peningkatan porositas dari 31% menjadi 37% meningkatkan nilai permeabilitas dari sekitar 30 mm/s menjadi hampir 47 mm/s. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan HDPE menghasilkan jaringan pori yang lebih saling terhubung (*interconnected void*), sehingga air dapat mengalir lebih cepat melalui tubuh beton.

Pada beton berpori dengan agregat split, diperoleh persamaan regresi $y = 1,9656x + 28,79$ dengan $R^2 = 0,8218$, yang bahkan menunjukkan korelasi lebih kuat. Peningkatan porositas dari 31% menjadi 38% meningkatkan permeabilitas dari ± 30 mm/s menjadi ± 46 mm/s. Gradien yang lebih rendah dibandingkan kerikil menunjukkan bahwa peningkatan permeabilitas pada beton split terjadi lebih stabil dan tidak sefluktuatif beton kerikil. Hal ini disebabkan oleh bentuk agregat split yang bersudut (*angular*), sehingga menciptakan distribusi rongga yang lebih seragam dan ikatan antarpartikel yang lebih baik, dapat dilihat pada Gambar 3.



Sumber: Peneliti, 2025

Gambar 3. Hubungan antara Kuat Tekan dan Porositas Beton Pori dengan Agregat Split dan Kerikil (FAS 0,40)

Secara mekanik, peningkatan permeabilitas pada campuran mengandung HDPE dipengaruhi oleh sifat fisik HDPE yang tidak menyerap air dan memiliki permukaan yang licin serta hidrofobik. Karakteristik ini menghambat pembasahan permukaan partikel oleh pasta semen dan menyebabkan terbentuknya rongga mikro di sekitar HDPE. Rongga tersebut kemudian terhubung membentuk jalur aliran yang lebih kontinyu, sehingga secara signifikan meningkatkan permeabilitas beton berpori. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa penambahan HDPE memberikan dampak positif terhadap aspek hidrolik beton berpori dengan meningkatkan konektivitas antarvoid dan melancarkan aliran air. Namun demikian, peningkatan permeabilitas yang terlalu tinggi perlu dikontrol karena berpotensi menurunkan kekuatan mekanik secara signifikan. Oleh sebab itu, kadar HDPE optimum diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara kemampuan drainase dan performa struktural beton berpori. Secara ilmiah, hubungan ini konsisten dengan model aliran pada beton berpori, di mana permeabilitas dipengaruhi dominan oleh ukuran pori efektif dan konektivitas rongga [28].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis hubungan densitas-kekuatan, porositas-kekuatan, dan porositas-permeabilitas, dapat disimpulkan bahwa substitusi limbah HDPE memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja mekanis dan hidraulik beton berpori. Peningkatan kandungan HDPE secara konsisten menurunkan densitas dan kuat tekan. Untuk campuran kerikil, kuat tekan menurun dari 16,75 MPa (0% HDPE) menjadi 10,32 MPa (15% HDPE), sementara campuran split menurun dari 18,92 MPa menjadi 15,41 MPa pada rentang substitusi yang sama. Densitas juga menurun dari sekitar $\pm 2100 \text{ kg/m}^3$ menjadi $\pm 1850 \text{ kg/m}^3$ seiring dengan peningkatan kandungan HDPE. Sebaliknya, penambahan HDPE meningkatkan porositas dan permeabilitas, di mana porositas meningkat dari 30–32% (0% HDPE) menjadi 37–38% (15% HDPE) dan permeabilitas meningkat dari 29–35 mm/detik menjadi 44–46 mm/detik.

Hubungan porositas-permeabilitas menghasilkan korelasi yang sangat kuat ($R^2 > 0,80$), yang menunjukkan bahwa kinerja hidraulik beton berpori sangat dipengaruhi oleh pembentukan struktur rongga terbuka dan saling terhubung yang dihasilkan oleh modifikasi HDPE. Secara keseluruhan, kandungan HDPE yang paling seimbang dengan mempertimbangkan kinerja menahan beban dan fungsi drainase ditemukan pada maksimum sekitar $\pm 5\%$. Tingkat substitusi di atas 10% cenderung menjadi tidak efektif secara mekanis untuk aplikasi yang tetap memerlukan persyaratan kuat tekan minimum. Dengan demikian, pemanfaatan HDPE pada kadar $\leq 5\%$ direkomendasikan untuk aplikasi perkerasan berpori seperti trotoar, jalur pejalan kaki, dan area parkir berdaya dukung rendah. Penelitian lanjutan disarankan mencakup analisis mikrostruktur (SEM/EDX) dan uji ketahanan jangka panjang terhadap siklus basah–kering serta *freeze–thaw*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Ahmad *et al.*, “A Step towards Sustainable Concrete with Substitution of Plastic Waste in Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis,” *Crystals (Basel)*, vol. 12, no. 7, p. 944, Jul. 2022, doi: 10.3390/cryst12070944.
- [2] R. Pal and P. Pratim Sarkar, “Developing a model of porous concrete-filled rigid pavement,” *Mater Today Proc*, May 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.05.333.

- [3] W. Zhou, C. Lu, Z. Yu, and J. Mo, "Mechanical properties and pore structure characterization of crumb rubber concrete using equal size replacement method," *Journal of Building Engineering*, vol. 102, May 2025, doi: 10.1016/J.JOBE.2025.112026.
- [4] R. S. Wibowo, "Effect of compaction temperature variations on the characteristics of marshall Asphalt Concrete-Wearing Course [AC-WC] using modified asphalt (asphalt Pertamina pen 60/70 with addition of 1.5% styrofoam)," *astonjadro*, vol. 12, no. 1, 2023, doi: 10.32832/astonjadro.v12i1.8277.
- [5] F. A. Sari, İ. Öztürk, T. Gönen, and M. Emiroğlu, "Evaluation of waste metallic powder as fine aggregate replacement in Roller compacted concrete: Impact on physical and mechanical properties," *Constr Build Mater*, vol. 468, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.140386.
- [6] A. Kishore, H. S. Chore, and R. Gupta, "Investigation of durability properties of grouted concrete pavement as alternative pavement for low traffic roads," *Mater Today Proc*, vol. 93, pp. 223–226, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.07.174.
- [7] RDI Kurnia, Suhaimi Suhaimi, Romaynoor Ismy, and Mukhlis Mukhlis, "Pengaruh Variasi Kombinasi Agregat Campuran Terhadap Gradasi dan Kuat Tekan Beton K-250," *Jurnal Teknik Sipil Unaya*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2024.
- [8] H. B. Tran and V. T. A. Phan, "Potential usage of fly ash and nano silica in high-strength concrete: Laboratory experiment and application in rigid pavement," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e02856, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.CSCM.2024.E02856.
- [9] Muh. Thahir Azikin, Siti Nurjanah Ahmad, Ridwan Syah Nuhun, Sulha, and Muammar Makmur, "Inovasi Teknologi Concrete Paving Block Untuk Mengatasi Kerusakan Jalan Lingkungan Di Kelurahan Anduonohu Kota Kendari," *STABILITA Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, vol. 7, no. 3, Nov. 2019.
- [10] L. A. Mathew and G. Joseph, "Natural Rubber Latex Modified High Performance Concrete," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, Nov. 2024, doi: 10.1007/S40996-024-01656-7.
- [11] C. Zheng *et al.*, "Review of porous vegetation eco-concrete (PVEC) technology: From engineering requirements to material design," *Compos B Eng*, vol. 279, p. 111442, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2024.111442.
- [12] Z. Kos, S. Kroviakov, V. Kryzhanovskiy, and A. Crnoja, "Influence of fibres and hardening accelerator on concrete for rigid pavements," *Magazine of Concrete Research*, vol. 75, no. 17, pp. 865–873, Apr. 2023, doi: 10.1680/JMACR.22.00181.
- [13] Z. Shen, Y. Zhang, G. Zhou, and Z. Wu, "Essential characteristics of rigid concrete airport pavements under cyclic traffic loading revealed from a thermodynamic perspective," *Constr Build Mater*, vol. 411, p. 134283, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134283.
- [14] M. I. Salama, A. Elayat, M. Reda, and G. Elsamak, "Influence of concrete type on rigid pavement behavior under static loads," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 9, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1007/S41062-023-01316-1.
- [15] J. B. Niyomukiza, A. Eisazadeh, and S. Tangtermsirikul, "Synergistic effect of calcined clay and fly ash on the performance of porous vegetation concrete," *Constr Build Mater*, vol. 458, no. August 2024, p. 139749, 2025, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.139749.
- [16] P. Luo, L. Liu, S. Wang, B. Ren, B. He, and D. Nover, "Influence assessment of new Inner Tube Porous Brick with absorbent concrete on urban floods control," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01236.
- [17] Badan Standarisasi Nasional, "SNI 03-2847-2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung," in *Badan Standarisasi Nasional*, 2019.
- [18] D. Ariyanti, N. A. Sasongko, M. H. Fansuri, E. L. Fitriana, R. A. Nugroho, and S. A. Pratiwi, "Retrofitting of concrete for rigid pavement using bacterial: A meta-analysis," *Science of The Total Environment*, vol. 902, p. 166019, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.166019.
- [19] R. Ardiansyah and R. Respati, "Perbandingan Jenis-Jenis Agregat Kasar Batu Merak, Batu Hampangan Dan Batu Banjar Untuk Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan Beton Normal K-250," *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil TRANSUKMA*, vol. 4, no. 2, pp. 144–152, Jun. 2022, doi: 10.36277/transukma.v4i2.136.
- [20] Badan Standarisasi Nasional, "SNI 1974-2011: Cara Uji Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder," 2011, *Jakarta*.
- [21] C. Li, Q. Ren, X. Qian, H. Zhao, and Z. Jiang, "Synergistic load-bearing performance of inflated membrane-concrete composite structure for pavement," *Constr Build Mater*, vol. 462, p. 139978, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.139978.
- [22] Widodo Kushartomo, Seehan Kuo, and Bramantyo Dipo Harsono, "Aplikasi Teknologi Reactive Powder Concrete Untuk Mengatasi Genangan Air Di Perumahan Banjar Wijaya Tangerang," *Jurnal Bakti Masyarakat Indonesia*, vol. 5, no. 2, Sep. 2022, doi: 10.24912/jbmi.v5i2.20242.

- [23] Z. Zhang *et al.*, “The Influence of Fly Ash and Slag on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete,” *Buildings*, vol. 14, no. 9, p. 2720, Aug. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14092720.
- [24] X. Zhang *et al.*, “Research on physical properties and plant adaptability of polyurethane modified cement based planting concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 466, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140222.
- [25] Badan Standarisasi Nasional, “SNI 03-2461-2002: Spesifikasi agregat ringan untuk beton ringan struktural,” Jakarta, 2002.
- [26] B. Cui, A. Luo, X. Zhang, and P. Huang, “Research Development and Key Issues of Pervious Concrete: A Review,” *Buildings*, vol. 14, no. 11, p. 3419, Oct. 2024, doi: 10.3390/buildings14113419.
- [27] T. Mulyono and Anisah, “Properties of pervious concrete with various types and sizes of aggregate,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 276, p. 01025, Mar. 2019, doi: 10.1051/matecconf/201927601025.
- [28] S. Sathvik *et al.*, “Enhancing urban sustainability: a study on lightweight and pervious concrete incorporating recycled plastic,” *Discover Sustainability*, vol. 5, no. 1, p. 421, Nov. 2024, doi: 10.1007/s43621-024-00644-1.