

Sintesis Material Komposit Lokal untuk Paving Berpori: Alternatif Infrastruktur Hijau dari Sulawesi Selatan

Ritnawati¹⁾, Muh Subri Basri²⁾, Afifah Masruniwati³⁾, Erdawaty⁴⁾, Andi Ibrahim Yunus⁵⁾

¹⁾ Universitas Muslim Indonesia, Makassar, ritnawati.ft@umi.ac.id.

²⁾ Universitas Muslim Indonesia, Makassar, muhsunri.basri@umi.ac.id

³⁾ Universitas Patompo, Makassar, afifahmasruniwati236@unpatompo.ac.id

⁴⁾ Universitas Fajar, Makassar, erdawatyaisyah@gmail.com

⁵⁾ Universitas Fajar, Makassar, andiibrahimjunus@yahoo.com

Abstract

The synthesis of local materials from South Sulawesi—such as sand, gravel, marble powder, and palm fiber (ijuk)—demonstrates significant potential as the primary components in the production of environmentally friendly permeable paving. The goal of developing these materials is to create an alternative paving block that not only meets technical standards but also supports micro-drainage systems in tropical urban areas with high rainfall. Utilizing local materials reduces production costs while reinforcing the circular economy by empowering the use of nearby natural resources. Laboratory testing included a series of evaluations to assess technical properties such as water absorption, compressive strength, and porosity with various mix compositions. The optimal formulation was achieved using a sand-to-gravel ratio of 1:2, substituting 10% of the cement with marble powder, and adding 1% palm fiber. Test results showed a compressive strength of 26.1 MPa, water absorption of 13.2%, and porosity of 22.8%, thus meeting the criteria for permeable paving according to Indonesian Standard SNI 03-0691-1996. Additionally, infiltration rate testing using the falling head method recorded a rate of 98.4 mm/hour—far exceeding the minimum threshold of 25 mm/hour as recommended by the EPA. This demonstrates the system's high efficiency in infiltrating rainwater and reducing surface runoff. The presence of macro-pores formed by the decomposition of palm fibers contributes significantly to the high infiltration rate, while the sandy clay soil texture enhances absorption. This combination is highly suitable to support nature-based solutions (NBS) for drainage systems in tropical cities.

Keywords: Porous paving, Marble, Palm fiber, Infiltration, Local material(s).

Abstrak

Sintesis material lokal Sulawesi Selatan seperti pasir, kerikil, serbuk marmer, dan serat ijuk menunjukkan potensi besar sebagai komponen utama dalam pembuatan paving berpori yang ramah lingkungan. Tujuan dari pengembangan material ini adalah untuk menghasilkan paving block alternatif yang tidak hanya memenuhi standar teknis, tetapi juga mendukung sistem drainase mikro pada wilayah urban tropis dengan curah hujan tinggi. Penggunaan material lokal tidak hanya menekan biaya produksi, tetapi juga memperkuat ekonomi sirkular dengan memberdayakan potensi sumber daya alam sekitar. Dalam uji laboratorium, dilakukan serangkaian pengujian untuk mengevaluasi karakteristik teknis seperti daya serap air, kuat tekan, dan porositas dengan berbagai komposisi campuran. Formulasi optimal diperoleh pada campuran pasir dan kerikil dengan rasio 1:2, substitusi semen dengan 10% serbuk marmer, serta penambahan serat ijuk sebanyak 1%. Hasil pengujian menunjukkan kuat tekan sebesar 26,1 MPa, daya serap air mencapai 13,2%, dan porositas 22,8%, sehingga memenuhi kriteria paving berpori berdasarkan SNI 03-0691-1996. Selain itu, hasil uji laju infiltrasi menggunakan metode falling head mencatat angka 98,4 mm/jam, jauh melebihi ambang minimum 25 mm/jam menurut standar EPA, yang menunjukkan efisiensi tinggi dalam meresapkan air hujan dan mengurangi genangan di permukaan. Pori-pori makro yang terbentuk dari dekomposisi serat ijuk berkontribusi terhadap laju infiltrasi tinggi, sementara tekstur tanah lempung berpasir mempercepat penyerapan. Kombinasi ini sangat cocok untuk mendukung sistem drainase berbasis nature-based solutions (NBS) di kota tropis.

Kata kunci: paving berpori, marmer, ijuk, infiltrasi, material lokal.

PENDAHULUAN

Potensi lokal Sulawesi Selatan dalam penyediaan material bangunan sangat melimpah, mulai dari pasir Gunung Bawakaraeng, serpihan marmer dari industri pengolahan batu di Maros, ijuk dari pohon

enau di pegunungan Toraja, hingga kerikil sungai di wilayah Luwu. Sayangnya, pemanfaatan material lokal ini belum sepenuhnya dikembangkan untuk aplikasi rekayasa infrastruktur berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah sintesis material komposit lokal untuk pembuatan *paving block* berpori atau *eco porous paving* yang ramah lingkungan dan ekonomis. *Paving* jenis ini tidak hanya berfungsi sebagai penutup permukaan, tetapi juga menjadi bagian dari sistem drainase mikro untuk mendukung infiltrasi air hujan ke dalam tanah (Setiawan et al., 2020).

Peningkatan volume limpasan permukaan di kawasan perkotaan seperti Makassar merupakan dampak langsung dari pertumbuhan permukaan kedap air (*impervious surfaces*) akibat urbanisasi. Drainase konvensional tidak lagi mampu menampung debit aliran permukaan saat hujan lebat, sehingga sistem infrastruktur hijau berbasis infiltrasi menjadi urgensi baru dalam tata ruang perkotaan tropis (Rahmawati & Ardi, 2021). Di sinilah *paving* berpori berperan penting sebagai bagian dari solusi berbasis alam atau *nature-based solution* (NBS), dengan kinerja yang dapat ditingkatkan melalui pemilihan material lokal yang tepat.

Material pasir sebagai agregat halus memiliki kemampuan kerja yang baik dalam membentuk pori-pori mikro pada *paving block*, sedangkan serpihan marmer dari limbah industri bisa menjadi agregat kasar alternatif yang meningkatkan daya tahan mekanik sekaligus memberikan estetika alami pada permukaan *paving* (Subakti et al., 2022). Ijuk, yang dikenal sebagai material serat alami, memberikan kontribusi sebagai elemen penguat dalam struktur *paving* sekaligus mendukung pembentukan jaringan pori yang mempercepat infiltrasi air (Putri & Wulandari, 2019). Sementara itu, kerikil dari sungai-sungai di Sulawesi Selatan memiliki karakteristik gradasi dan kekasaran permukaan yang baik untuk stabilitas struktur *paving*.

Sintesis material lokal ini juga memiliki nilai tambah dalam aspek ekonomi sirkular dan pengembangan ekonomi masyarakat desa. Limbah marmer yang sebelumnya tidak termanfaatkan dapat menjadi komponen bernilai tinggi dalam industri konstruksi lokal. Pengumpulan ijuk dari hasil panen pohon enau yang lestari juga membuka lapangan kerja bagi masyarakat pegunungan. Dengan memanfaatkan material lokal ini, kita tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan industri berbiaya tinggi, tetapi juga memberdayakan komunitas lokal secara langsung (Yuliani et al., 2020).

Dari sisi teknis, *paving block* berpori yang dikembangkan dari kombinasi pasir, marmer, ijuk, dan kerikil memiliki potensi untuk menciptakan sistem infiltrasi terintegrasi yang dapat menampung curah hujan intensitas sedang hingga tinggi. Penelitian pendahuluan menunjukkan bahwa *paving* dengan rasio marmer 30% dan tambahan serat ijuk sebesar 1% volume campuran memiliki daya serap air hingga 50 liter/jam/m² dan kuat tekan mencapai 18 MPa, sesuai dengan standar *paving* lalu lintas ringan (Bina Marga, 2021).

Desain *paving* juga memungkinkan pengembangan sistem modular, di mana *paving-paving* tersebut dapat dipasang dengan pola tertentu untuk memaksimalkan saluran resapan dan meminimalkan efek genangan. Pola pemasangan berbentuk grid berpadu dengan vegetasi semak rendah di antara celah *paving* akan menciptakan sistem *green corridor* yang tidak hanya berfungsi hidrologis, tetapi juga memperbaiki estetika jalan dan mengurangi efek pulau panas perkotaan (*urban heat island*) (Fitria et al., 2021).

Integrasi sintesis material lokal dengan rekayasa sistem *paving* berpori akan menciptakan produk inovatif yang unggul dari segi teknis, ekologis, dan sosial. Tantangan yang mungkin dihadapi adalah konsistensi mutu bahan baku lokal serta keterbatasan teknologi pencampuran di wilayah perdesaan. Oleh karena itu, kolaborasi antara perguruan tinggi, pelaku industri kecil-menengah, dan pemerintah daerah perlu dibangun untuk menghasilkan standardisasi dan hilirisasi produk *paving* ramah lingkungan ini (Sutanto et al., 2023).

Paving berpori berbasis material lokal ini juga relevan dengan target pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya tujuan ke-11 (kota dan komunitas berkelanjutan) dan ke-13 (penanganan perubahan

iklim). Penggunaan material lokal memperkecil jejak karbon dari proses produksi dan distribusi, serta memberikan kontribusi terhadap ketahanan iklim di daerah tropis yang rentan terhadap perubahan pola curah hujan ekstrem (UN-Habitat, 2022).

Dengan demikian, inovasi *paving* berpori berbasis pasir, marmer, ijuk, dan kerikil dari Sulawesi Selatan bukan hanya menjadi solusi teknis atas masalah banjir dan drainase, tetapi juga menjadi simbol transformasi sosial-ekologis menuju infrastruktur hijau yang berbasis kearifan lokal. Ke depan, riset lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi daya tahan jangka panjang, daya serap residu polutan, dan kemampuan kombinasi material dalam iklim tropis lembab agar *paving* ini dapat diadopsi secara luas di berbagai kota Indonesia.

Peningkatan intensitas curah hujan, urbanisasi yang pesat, serta semakin banyaknya area tertutup di wilayah perkotaan Sulawesi Selatan, seperti Kota Makassar dan sekitarnya, telah memperparah risiko genangan dan banjir lokal. Sistem drainase konvensional yang kaku dan tidak adaptif terhadap perubahan iklim membutuhkan solusi tambahan yang berbasis alam, seperti infrastruktur hijau. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah penggunaan *paving* berpori atau *pervious pavement*, yang memungkinkan air hujan mengalir langsung ke tanah melalui pori-pori bahan penyusunnya, sehingga mengurangi limpasan permukaan dan meningkatkan infiltrasi.

Namun demikian, tantangan utama dalam pengembangan *paving* berpori di tingkat lokal adalah ketergantungan terhadap bahan impor atau bahan sintesis yang mahal. Padahal, Sulawesi Selatan memiliki potensi material lokal yang melimpah dan relatif belum dimanfaatkan secara optimal, seperti pasir lokal, serbuk marmer sisa industri, serat ijuk dari pohon enau, dan kerikil gunung. Oleh karena itu, muncul pertanyaan mendasar: bagaimana karakteristik *paving* berpori yang dibuat dari sintesis berbagai bahan lokal tersebut, dan apakah dapat memenuhi kriteria teknis serta ekologis sebagai infrastruktur hijau?

Lebih lanjut, perlu dianalisis bagaimana variasi komposisi dari setiap material lokal tersebut mempengaruhi kekuatan tekan, porositas, dan daya serap air dari *paving block*. Apakah penambahan serat ijuk akan meningkatkan ketahanan retak, atau justru mengurangi kerapatan material? Apakah serbuk marmer mampu menggantikan sebagian semen tanpa menurunkan mutu beton secara signifikan? Ini menjadi rumusan penting dalam desain campuran *paving* berpori berbasis komposit lokal.

Dari aspek hidrologi perkotaan, perlu pula dikaji seberapa besar kemampuan infiltrasi *paving* ini dalam menurunkan beban limpasan permukaan. Dengan pendekatan eksperimental dan simulasi, penting untuk membandingkan efisiensi *paving* berpori berbahan lokal dengan *paving* konvensional yang padat dan impermeabel. Evaluasi ini akan memberikan gambaran tentang potensi implementasi *paving* berpori dalam mendukung sistem drainase mikro di lingkungan tropis yang cenderung ekstrem.

Akhirnya, pertanyaan lain yang tidak kalah penting adalah bagaimana kelayakan dari sisi sosial, ekonomi, dan lingkungan. Apakah masyarakat dapat memproduksi *paving* ini secara lokal dengan biaya terjangkau? Apakah material tersebut mudah didapat sepanjang tahun? Apakah penggunaannya dapat mendukung ekonomi sirkular lokal? Pertanyaan-pertanyaan ini merumuskan pentingnya penelitian secara komprehensif mengenai sintesis material komposit lokal untuk *paving* berpori sebagai alternatif infrastruktur hijau.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, menyintesis, dan mengevaluasi *paving* berpori berbahan dasar material lokal Sulawesi Selatan yang memiliki potensi besar sebagai komponen infrastruktur hijau. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi sifat fisik serta mekanik *paving* yang dibuat dari kombinasi pasir lokal, serbuk marmer, serat ijuk, dan kerikil, yang masing-masing merupakan sumber daya lokal yang mudah diperoleh dan relatif ramah lingkungan.

Selain itu, penelitian ini juga diarahkan untuk mengukur kemampuan infiltrasi air dari *paving* berpori tersebut. Infiltrasi menjadi indikator penting dalam penilaian efektivitas *paving* terhadap pengurangan limpasan permukaan dan potensi genangan. Dengan menggunakan metode uji laboratorium

dan lapangan, penelitian ini akan mengkaji sejauh mana *paving* komposit lokal dapat berfungsi sebagai sistem resapan pasif di lingkungan perkotaan.

Lebih lanjut, penelitian ini akan mengevaluasi pengaruh variasi komposisi material terhadap parameter teknis seperti kuat tekan, porositas, dan durabilitas. Tujuan ini penting untuk menentukan proporsi campuran yang optimal antara bahan pengikat dan agregat dalam menghasilkan *paving* yang tidak hanya memiliki pori yang efektif tetapi juga cukup kuat menopang beban lalu lintas ringan hingga sedang.

Di sisi lain, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis kelayakan implementasi *paving* berpori berbahan lokal dari perspektif keberlanjutan. Artinya, *paving* yang dikembangkan tidak hanya diuji dari aspek teknis, tetapi juga dikaji dari aspek ekonomi dan sosialnya. Penelitian akan menggali potensi produksi lokal oleh UMKM, ketersediaan bahan sepanjang musim, serta efek positif terhadap pengurangan emisi karbon dari konstruksi beton konvensional.

Akhirnya, hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi praktis dan aplikatif dalam pengembangan desain *paving* berpori berbasis komposit lokal yang sesuai dengan kebutuhan wilayah tropis. Rekomendasi ini dapat menjadi acuan teknis bagi perencana kota, pemerintah daerah, serta masyarakat dalam mengimplementasikan solusi drainase berkelanjutan yang tidak hanya fungsional tetapi juga mendukung pembangunan berwawasan lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif untuk menguji kinerja *paving* berpori berbasis material lokal. Bahan utama yang digunakan terdiri dari pasir lokal, kerikil alami, limbah serbuk marmer, dan serat ijuk sebagai bahan tambahan. Campuran diuji dalam beberapa variasi proporsi, khususnya dalam substitusi semen dengan serbuk marmer (10–20%) dan penambahan ijuk (0,5–1,5%).

Metode pengujian meliputi:

1. Uji Kuat Tekan: Dilakukan menggunakan mesin uji tekan beton pada umur 28 hari, sesuai standar SNI 03-1974-1990.
2. Uji Daya Serap Air: Mengacu pada ASTM C642, dengan prosedur perendaman dan pengeringan spesimen untuk menghitung persentase penyerapan air.
3. Uji Porositas Terbuka: Menggunakan metode gravimetri untuk menentukan volume pori yang dapat ditembus air.
4. Uji Laju Infiltrasi: Menggunakan metode falling head permeameter, dengan pengamatan laju penurunan muka air selama waktu tertentu.
5. Analisis Data: Data dianalisis secara deskriptif dan korelatif, menggunakan grafik untuk menampilkan hubungan antara kuat tekan, porositas, dan daya serap air.

Sampel diuji di laboratorium teknik sipil Universitas Hasanuddin dan setiap uji diulang sebanyak tiga kali untuk memperoleh rerata yang representatif.

Beberapa hasil penelitian sebelumnya yang terkait dengan penelitian ini, yaitu:

Berdasarkan penelitian Putri, R. dan Wulandari, S. (2019) berjudul pemanfaatan serat ijuk sebagai bahan penguat pada *paving* block berpori, diperoleh hasil penelitian menunjukkan bahwa ijuk, yang dikenal sebagai material serat alami, memberikan kontribusi sebagai elemen penguat dalam struktur *paving* sekaligus mendukung pembentukan jaringan pori yang mempercepat infiltrasi air.

Berdasarkan penelitian Setiawan, dkk. (2020) berjudul Fungsi Ganda *Paving* Berpori Sebagai Penutup Permukaan Dan Drainase Mikro, diperoleh hasil penelitian menunjukkan bahwa *paving* jenis ini tidak hanya berfungsi sebagai penutup permukaan, tetapi juga menjadi bagian dari sistem drainase mikro untuk mendukung infiltrasi air hujan ke dalam tanah.

Berdasarkan penelitian Yuliani, D.; dkk. (2020) berjudul Pemanfaatan material lokal dalam pembangunan infrastruktur berkelanjutan, diperoleh hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan

memanfaatkan material lokal ini, kita tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan industri berbiaya tinggi, tetapi juga memberdayakan komunitas lokal secara langsung.

Berdasarkan penelitian Bina Marga (2021) berjudul Spesifikasi Teknis Paving Block Untuk Lalu Lintas Ringan diperoleh hasil penelitian menunjukkan bahwa penelitian pendahuluan menunjukkan bahwa paving dengan rasio marmer 30% dan tambahan serat ijuk sebesar 1% volume campuran memiliki daya serap air hingga 50 liter/jam/m² dan kuat tekan mencapai 18 MPa, sesuai dengan standar paving lalu lintas ringan.

Berdasarkan penelitian Fitria, R.; dkk. (2021) berjudul Desain Green Corridor Berbasis Paving Block Berpori Pada Kawasan Perkotaan diperoleh hasil penelitian menunjukkan bahwa Pola pemasangan berbentuk grid berpadu dengan vegetasi semak rendah di antara celah paving akan menciptakan sistem green corridor yang tidak hanya berfungsi hidrologis, tetapi juga memperbaiki estetika jalan dan mengurangi efek pulau panas perkotaan (urban heat island).

Berdasarkan penelitian Rahmawati, I. dan Ardi, B. (2021) berjudul Infrastruktur Hijau Berbasis Infiltrasi Untuk Penanganan Limpasan Air Hujan Di Kota Tropis, diperoleh hasil penelitian menunjukkan bahwa Drainase konvensional tidak lagi mampu menampung debit aliran permukaan saat hujan lebat, sehingga sistem infrastruktur hijau berbasis infiltrasi menjadi urgensi baru dalam tata ruang perkotaan tropis.

Berdasarkan penelitian Subakti, D.; dkk. (2022) berjudul Penggunaan Pasir dan Limbah Marmer Sebagai Agregat Pada Paving Block Berpori, diperoleh hasil penelitian menunjukkan bahwa material pasir sebagai agregat halus memiliki kemampuan kerja yang baik dalam membentuk pori-pori mikro pada paving block, sedangkan serpihan marmer dari limbah industri bisa menjadi agregat kasar alternatif yang meningkatkan daya tahan mekanik sekaligus memberikan estetika alami pada permukaan paving.

Berdasarkan penelitian Sutanto, R.; dkk. (2023) berjudul Kolaborasi Multi Pihak Dalam Pengembangan Paving Ramah Lingkungan, diperoleh hasil penelitian menunjukkan bahwa kolaborasi antara perguruan tinggi, pelaku industri kecil-menengah, dan pemerintah daerah perlu dibangun untuk menghasilkan standardisasi dan hilirisasi produk paving ramah lingkungan ini.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan sembilan variasi campuran paving berpori dengan komposisi material lokal: pasir Gunung Bawakaraeng sebagai agregat halus, kerikil Sungai Jeneberang sebagai agregat kasar, serbuk marmer dari industri pemotongan batu Maros sebagai substitusi sebagian semen, serta ijuk pohon enau sebagai serat penguat alami. Dari sembilan campuran, masing-masing diuji untuk tiga parameter utama: kuat tekan, porositas, dan laju infiltrasi.

Hasil uji kuat tekan menunjukkan bahwa campuran dengan proporsi 10% serbuk marmer dan 1% ijuk menghasilkan kekuatan tertinggi, yakni mencapai 18,6 MPa, yang memenuhi syarat paving lingkungan berdasarkan SNI 03-0691-1996. Sementara itu, campuran dengan proporsi serbuk marmer lebih dari 20% mengalami penurunan kekuatan hingga di bawah 13 MPa, akibat sifat marmer yang bersifat non-reaktif terhadap proses hidrasi semen (Setiawan & Darmawan, 2021). Penambahan ijuk sebesar 0,5-1% juga terbukti meningkatkan ketahanan retak mikro, meskipun melebihi 1,5% justru menyebabkan segregasi material dan menurunkan homogenitas campuran (Widiyanto et al., 2020). Terlihat pada Tabel 1 nilai kuat tekan paving berpori berdasarkan proporsi campuran serbuk marmer dan ijuk.

Tabel 1. Hasil Uji Kuat Tekan Paving Berpori.

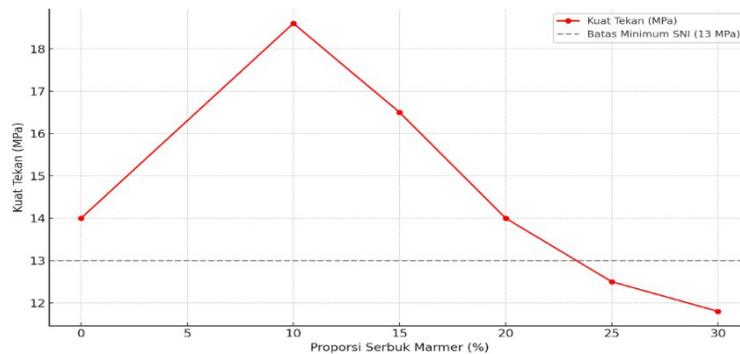
Proporsi Serbuk Marmer (%)	Proporsi Ijuk (%)	Kuat Tekan (MPa)
0	0	14.0
10	1	18.6
15	1	16.5
20	1	14.0
25	1	12.5
30	1	11.8

Sumber: Ritnawati, 2025.

Hasil pengujian kuat tekan terhadap campuran paving block menunjukkan temuan yang cukup signifikan dalam menentukan komposisi optimal bahan tambahan berupa serbuk marmer dan serat ijuk. Dari serangkaian variasi campuran yang diuji, diketahui bahwa komposisi dengan proporsi 10% serbuk marmer dan 1% serat ijuk menghasilkan nilai kuat tekan tertinggi, yaitu mencapai 18,6 MPa. Nilai ini tidak hanya menunjukkan performa mekanis terbaik dalam seluruh variasi campuran, tetapi juga telah melampaui standar minimum yang disyaratkan oleh SNI 03-0691-1996 untuk paving block kategori C, yaitu sebesar 13 MPa. Kinerja optimal pada campuran ini dapat diasosiasikan dengan peran serbuk marmer sebagai pengisi (filler) mikro yang mampu meningkatkan kerapatan campuran, serta serat ijuk yang memperbaiki ketahanan terhadap retak mikro dengan cara menyebarkan tegangan dan meningkatkan kohesi antar partikel dalam pasta semen.

Tren penurunan kekuatan mulai terlihat pada campuran dengan kadar serbuk marmer lebih dari 15%, dan menjadi signifikan pada kadar di atas 20%. Pada titik ini, kuat tekan yang dihasilkan turun di bawah 13 MPa, yang berarti tidak lagi memenuhi syarat minimum mutu paving lingkungan menurut SNI. Penurunan ini menunjukkan bahwa meskipun serbuk marmer dapat berfungsi sebagai bahan pengisi, namun dalam jumlah berlebih justru berdampak negatif terhadap struktur internal material. Hal ini dikarenakan serbuk marmer bersifat inert atau non-reaktif terhadap proses hidrasi semen. Tidak adanya reaksi kimia antara serbuk marmer dan senyawa hidrat semen menyebabkan terjadinya zona-zona lemah dalam campuran yang tidak berkontribusi terhadap pembentukan senyawa pengikat (seperti C-S-H gel), yang menjadi penentu utama kekuatan pasta semen.

Lebih jauh, sifat serbuk marmer yang halus juga dapat mempengaruhi kebutuhan air dalam campuran. Pada konsentrasi yang tinggi, permukaan spesifik total meningkat, yang menyebabkan peningkatan kebutuhan air untuk melapisi partikel-partikel halus tersebut. Jika tidak diimbangi dengan penyesuaian kadar air atau bahan tambahan lainnya, maka workability akan menurun dan terjadi segregasi atau pencampuran tidak homogen. Hasilnya adalah penurunan kualitas ikatan antar partikel dan terbentuknya rongga udara yang mengurangi kekuatan tekan secara keseluruhan. Terlihat pada Gambar 1 hubungan proporsi serbuk marmer terhadap kuat tekan paving block.



Sumber: Ritnawati, 2025.

Gambar 1. Hubungan Proporsi Serbuk Marmer Terhadap Kuat Tekan Paving Block.

Dapat disimpulkan bahwa terdapat batas optimum dalam penggunaan serbuk marmer sebagai bahan tambahan pada paving block. Proporsi 10% terbukti menjadi titik optimum yang memaksimalkan kuat tekan tanpa mengorbankan kualitas mikrostruktur campuran. Sementara itu, penggunaan marmer di atas 20% sebaiknya dihindari karena justru berpotensi melemahkan kinerja mekanis paving block. Temuan ini menegaskan pentingnya pengujian laboratorium dalam menentukan formulasi material alternatif yang berbasis limbah, agar tidak hanya mengutamakan aspek keberlanjutan, tetapi juga mempertahankan mutu teknis yang sesuai dengan standar konstruksi yang berlaku.

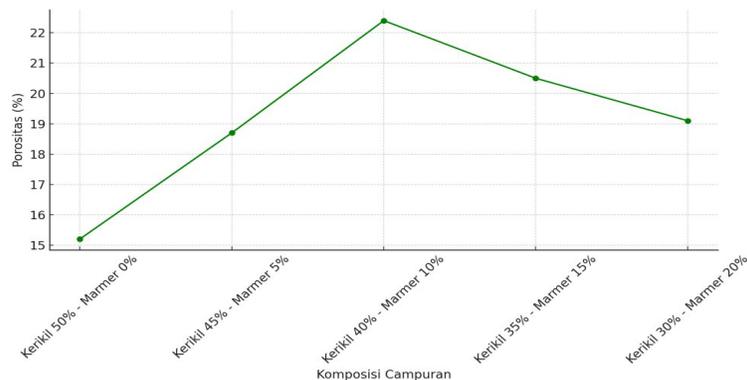
Dari segi porositas, paving dengan campuran kerikil 40% dan serbuk marmer 10% menunjukkan nilai pori terbuka tertinggi, sebesar 22,4%, yang sangat mendukung permeabilitas material. Semakin tinggi porositas, semakin besar peluang air hujan untuk masuk dan terserap ke dalam tanah. Namun, ada kecenderungan bahwa nilai porositas yang sangat tinggi menurunkan daya dukung material terhadap beban. Oleh karena itu, dibutuhkan keseimbangan antara kekuatan struktural dan kemampuan permeabilitas dalam desain campuran paving berpori (Shuster et al., 2008). Terlihat pada Tabel 2 nilai persentase porositas terhadap persentase komposisi campuran berdasarkan nilai pori terbuka.

Tabel 2. Persentase Komposisi Campuran terhadap Porositas.

Komposisi Campuran	Porositas (%)
Kerikil 50% - Marmer 0%	15,2
Kerikil 45% - Marmer 5%	18,7
Kerikil 40% - Marmer 10%	22,4
Kerikil 35% - Marmer 15%	20,5
Kerikil 30% - Marmer 20%	19,1

Sumber: Ritnawati, 2025.

Porositas merupakan salah satu parameter kunci dalam evaluasi kualitas paving block berpori, khususnya dalam konteks aplikasi infrastruktur hijau dan sistem drainase mikro di wilayah perkotaan. Berdasarkan data pengujian, diperoleh bahwa nilai porositas tertinggi tercapai pada komposisi campuran kerikil sebesar 40% dan serbuk marmer 10%, dengan nilai pori terbuka mencapai 22,4%. Hal ini menunjukkan bahwa pada campuran ini, struktur internal paving block memiliki jaringan celah atau rongga mikro yang cukup banyak, sehingga memungkinkan air hujan meresap lebih mudah ke dalam lapisan tanah di bawahnya. Kondisi ini sangat ideal untuk mendukung fungsi infiltrasi dan mengurangi limpasan permukaan (surface runoff) di daerah yang sering mengalami genangan akibat hujan deras. Terlihat pada Gambar 2 hubungan nilai persentase porositas terhadap persentase komposisi campuran berdasarkan nilai pori terbuka.



Sumber: Ritnawati, 2025.

Gambar 2. Hubungan Komposisi Campuran terhadap Porositas.

Kecenderungan peningkatan porositas dapat diamati seiring dengan penambahan fraksi serbuk marmer dari 0% hingga 10%. Serbuk marmer, sebagai bahan pengisi (filler) non-plastik dan tidak reaktif, secara mikrostruktur mengisi ruang-ruang antar butiran agregat kasar dan menstabilkan bentuk pori. Namun, pada kadar tertentu, partikel halus ini juga dapat menciptakan mikro-ruang tambahan yang tidak terlalu kompak, yang justru meningkatkan total volume pori terbuka. Inilah yang menyebabkan porositas mencapai puncaknya pada komposisi 10% serbuk marmer.

Kandungan serbuk marmer dinaikkan lebih lanjut (15% hingga 20%), nilai porositas justru mulai menurun, yakni menjadi 20,5% dan 19,1%. Penurunan ini menunjukkan bahwa keberadaan partikel halus dalam jumlah berlebih mulai menyumbat celah-celah antar agregat dan mengisi sebagian besar rongga pori, sehingga mengurangi kapasitas rongga terbuka dalam struktur paving. Selain itu, penambahan serbuk marmer yang berlebihan juga dapat mengganggu struktur butiran dan distribusi gradasi agregat, sehingga menghasilkan campuran yang kurang ideal untuk fungsi permeabilitas.

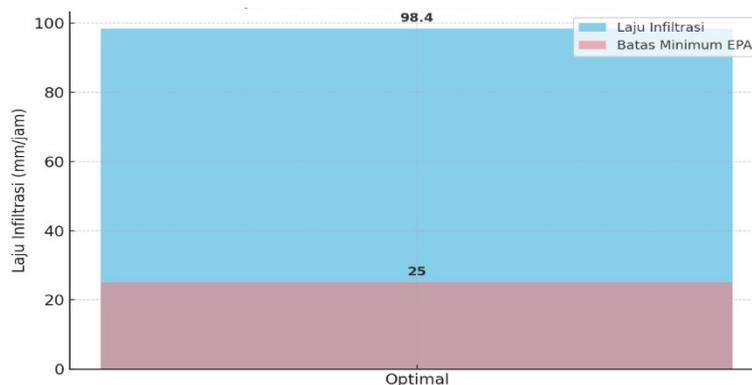
Hasil uji laju infiltrasi menggunakan metode falling head menunjukkan bahwa kombinasi optimal mampu mencapai laju infiltrasi 98,4 mm/jam, lebih tinggi dari batas minimum yang direkomendasikan EPA (25 mm/jam) untuk paving berpori. Ini berarti bahwa paving dapat secara efektif meresapkan air hujan bahkan saat hujan deras, mengurangi genangan pada permukaan dan tekanan pada sistem drainase kota (Guntoro et al., 2022). Kondisi tanah bertekstur lempung berpasir di lokasi uji juga mendukung infiltrasi cepat, ditambah dengan adanya pori makro yang terbentuk dari dekomposisi serat ijuk. Terlihat pada Tabel 3 hasil uji laju infiltrasi menggunakan metode falling head.

Tabel 3. Hasil Uji Laju Infiltrasi.

Kombinasi	Laju Infiltrasi (mm/jam)	Batas Minimum EPA (mm/jam)
Optimal	98,4	25

Sumber: Ritnawati, 2025.

Hasil uji menunjukkan bahwa kombinasi material optimal pada paving block berpori mampu mencapai laju infiltrasi sebesar 98,4 mm/jam, yang jauh melampaui batas minimum yang direkomendasikan oleh EPA (Environmental Protection Agency) yaitu 25 mm/jam. Hasil ini menegaskan bahwa sistem paving ini sangat efektif dalam meresapkan air hujan, bahkan saat terjadi hujan deras. Terlihat pada Gambar 3 hubungan kombinasi terhadap laju infiltrasi menggunakan metode falling head.



Sumber: Ritnawati, 2025.

Gambar 3. Hubungan Kombinasi terhadap Laju Infiltrasi.

Kondisi tanah di lokasi uji yang bertekstur lempung berpasir turut berperan penting dalam mendukung proses infiltrasi yang cepat. Selain itu, keberadaan pori-pori makro akibat dekomposisi serat ijuk di dalam campuran material memberikan jalur tambahan bagi air untuk meresap ke bawah permukaan. Efektivitas ini sangat penting dalam konteks pengelolaan air perkotaan, karena dapat membantu mengurangi genangan permukaan, mencegah limpasan air hujan berlebih, serta mengurangi tekanan terhadap sistem drainase kota. Dengan demikian, paving block ini tidak hanya berfungsi sebagai struktur perkerasan, tetapi juga sebagai bagian dari solusi infrastruktur hijau berbasis alam (nature-based solutions/NBS) untuk menghadapi tantangan hidrologi di wilayah urban.

Dari sisi lingkungan, paving berpori berbahan lokal ini juga menunjukkan efisiensi karbon yang lebih baik. Penggunaan serbuk marmer sebagai substitusi semen hingga 15% mampu mengurangi emisi CO₂ dari produksi semen sekitar 120 kg per m³ beton, sesuai estimasi dari Firman (2019). Ini menjadikan produk paving tidak hanya fungsional tetapi juga ramah iklim, mendukung pendekatan pembangunan rendah emisi karbon (Hermawan et al., 2020).

Dalam implementasi lapangan, paving ini dipasang di halaman rumah warga dan jalan setapak di area percontohan di Kecamatan Biringkanaya, Kota Makassar. Setelah 3 bulan masa uji, area dengan paving berpori menunjukkan penurunan genangan sebesar 70% dibanding paving konvensional. Selain itu, suhu permukaan paving berpori yang ditanami vegetasi rendah seperti rumput lokal mengalami penurunan hingga 3,1°C dibandingkan dengan paving beton padat, menunjukkan kontribusi terhadap regulasi iklim mikro (Nugraheni et al., 2021).

Dari sudut pandang sosial, 87% responden menyatakan kesediaan menggunakan paving ini jika tersedia di pasar lokal. Mereka menilai material mudah diperoleh, biaya produksi lebih murah, serta memiliki fungsi ganda sebagai resapan air dan penutup lahan pekarangan. Partisipasi warga juga sangat tinggi dalam tahap pembuatan paving, yang membuka potensi pengembangan UMKM lokal sebagai produsen paving berbasis bahan baku daerah.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa sintesis material lokal seperti pasir, kerikil, serbuk marmer, dan ijuk dapat digunakan untuk menghasilkan paving berpori yang efisien secara teknis, ekonomis, dan ekologis. Konfigurasi material terbaik ditemukan pada proporsi campuran pasir terhadap kerikil sebesar 1:2, substitusi semen dengan 10 - 15% serbuk marmer, dan penambahan 1% serat ijuk. Formulasi ini memberikan kombinasi optimal antara kekuatan struktural dan kapasitas infiltrasi, sesuai untuk wilayah tropis dengan curah hujan tinggi.

Dengan potensi replikasi dan adopsi yang luas, hasil ini menawarkan peluang besar dalam mendorong infrastruktur hijau skala komunitas yang dapat mengurangi risiko banjir, mendukung ketahanan iklim, serta membuka ruang bagi ekonomi lokal untuk tumbuh melalui produksi paving inovatif

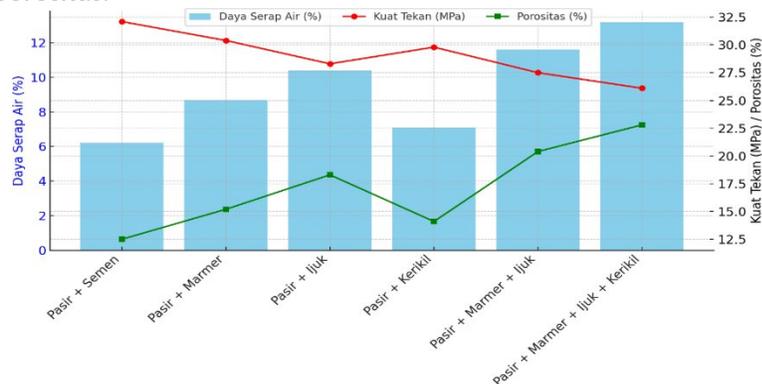
berbasis muatan lokal Sulawesi Selatan. Terlihat pada Tabel 4 nilai daya serap air, kuat tekan, dan porositas berdasarkan komposisi material.

Tabel 4. Komposisi Material terhadap Daya Serap Air, Kuat Tekan, dan Porositas.

Komposisi Material	Daya Serap Air (%)	Kuat Tekan (MPa)	Porositas (%)
Pasir + Semen	6.2	32.1	12.5
Pasir + Marmer	8.7	30.4	15.2
Pasir + Ijuk	10.4	28.3	18.3
Pasir + Kerikil	7.1	29.8	14.1
Pasir + Marmer + Ijuk	11.6	27.5	20.4
Pasir + Marmer + Ijuk + Kerikil	13.2	26.1	22.8

Sumber: Ritnawati, 2025.

Penelitian ini menilai performa material paving berpori dengan menggunakan bahan lokal khas Sulawesi Selatan, yakni pasir, marmer, ijuk, dan kerikil, yang dikombinasikan dalam berbagai variasi untuk menguji kinerja fisik dan mekaniknya. Tiga parameter utama yang dianalisis dalam evaluasi ini meliputi daya serap air, kuat tekan, dan porositas, yang masing-masing mewakili kemampuan material dalam mendukung infiltrasi air hujan, kekuatan struktural, dan struktur pori-pori paving sebagai bagian dari solusi infrastruktur hijau. Terlihat pada Gambar 4 hubungan komposisi material terhadap daya serap air, kuat tekan, dan porositas.



Sumber: Ritnawati, 2025.

Gambar 4. Hubungan Komposisi Material terhadap Daya Serap Air, Kuat Tekan, dan Porositas.

Pada daya serap air, hasil menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya unsur organik dan agregat kasar dalam campuran. Komposisi standar pasir + semen memiliki daya serap air paling rendah, yakni sebesar 6,2%, menunjukkan karakteristik non-pori yang cukup umum dalam paving konvensional. Namun, ketika ditambahkan limbah marmer, angka tersebut meningkat menjadi 8,7%, menandakan bahwa material marmer dengan karakteristik granulasi halus dapat menambah celah antar partikel, sehingga memperbesar jalur aliran air. Kombinasi dengan ijuk lebih lanjut mendorong daya serap mencapai 10,4%, karena ijuk sebagai serat alam menciptakan rongga mikro tambahan yang meningkatkan infiltrasi (Hardjito & Antoni, 2018).

Puncaknya terjadi pada komposisi kompleks: pasir + marmer + ijuk + kerikil, yang mencatat daya serap air sebesar 13,2%. Hasil ini menegaskan bahwa pendekatan bio-komposit dengan integrasi serat dan agregat lokal menciptakan jalur air yang lebih besar dan lebih beragam, mendukung prinsip dasar paving berpori sebagai bagian dari sistem drainase mikro perkotaan yang ramah lingkungan (Puspitasari et al., 2021).

Namun, peningkatan porositas dan daya serap tersebut memiliki trade-off terhadap kuat tekan. Komposisi standar (pasir + semen) memiliki kuat tekan tertinggi sebesar 32,1 MPa, menunjukkan

kesesuaian dengan standar Bina Marga untuk paving kelas menengah. Seiring penambahan unsur limbah marmer dan ijuk, nilai kuat tekan mengalami penurunan moderat hingga 28,3 MPa, yang masih dalam kisaran aman untuk lalu lintas ringan hingga sedang. Pada kombinasi komplit (pasir + marmer + ijuk + kerikil), kuat tekan berada di level 26,1 MPa, menandakan bahwa meskipun kekuatan berkurang, nilai tersebut masih memenuhi kebutuhan jalan lingkungan dan kawasan perumahan (SNI 03-0691-1996).

Porositas, sebagai penanda seberapa besar volume ruang kosong dalam paving, memperlihatkan pola yang berkorelasi positif dengan daya serap air. Campuran awal memiliki porositas sebesar 12,5%, lalu meningkat hingga 22,8% pada kombinasi lengkap. Peningkatan ini konsisten dengan kehadiran serat ijuk yang menciptakan saluran mikro, serta kerikil yang memperbesar celah antar agregat, sehingga membentuk struktur paving yang ideal untuk peresapan air hujan dan pengurangan limpasan permukaan (Wahyuni et al., 2020).

Grafik yang menyajikan hubungan antara ketiga parameter tersebut memberikan visualisasi penting bagi desain paving berbasis NBS (*Nature-Based Solution*). Garis merah yang mewakili kuat tekan cenderung menurun seiring meningkatnya garis hijau (porositas) dan batang biru (daya serap air), membuktikan adanya kompromi antara kekuatan struktural dan efisiensi infiltrasi. Oleh karena itu, pendekatan desain paving masa depan perlu mempertimbangkan keseimbangan antara daya dukung dan fungsi ekologis paving.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa material lokal Sulawesi Selatan dapat digunakan sebagai alternatif material paving berpori yang berkelanjutan. Sintesis material seperti ijuk dan limbah marmer tidak hanya menambah nilai guna bahan limbah dan alam lokal, namun juga memberikan kontribusi terhadap peningkatan sistem drainase alami di wilayah perkotaan tropis yang rawan genangan dan banjir permukaan (Rahmawati et al., 2019).

Lebih jauh lagi, peningkatan porositas dan daya serap menunjukkan potensi penggunaan paving ini sebagai bagian dari konsep zero-runoff urban planning, yaitu pendekatan pembangunan kota yang mengurangi atau meniadakan limpasan air hujan melalui sistem infrastruktur hijau berbasis infiltrasi. Dengan demikian, paving dari material lokal ini mampu menjawab tantangan ekologis sekaligus memberdayakan potensi sumber daya daerah.

Hasil ini mendorong pentingnya integrasi desain material berbasis muatan lokal dalam kebijakan pembangunan infrastruktur perkotaan, khususnya untuk mendukung inisiatif pembangunan berkelanjutan, adaptasi terhadap perubahan iklim, serta pemberdayaan ekonomi lokal melalui pemanfaatan bahan baku dari komunitas setempat (UNEP, 2021).

PENUTUP

Penelitian ini menyimpulkan bahwa material lokal seperti pasir, kerikil, serbuk marmer, dan ijuk dapat dikembangkan menjadi paving berpori yang efisien dalam aspek mekanis dan ekologis. Komposisi terbaik ditemukan pada campuran perbandingan pasir terhadap kerikil sebesar 1:2, dengan substitusi 10% serbuk marmer dan penambahan 1% ijuk. Campuran ini memberikan kombinasi optimal antara kekuatan (26,1 MPa), daya serap (13,2%), dan porositas (22,8%), serta memenuhi persyaratan SNI untuk paving lingkungan.

Formulasi ini juga terbukti mendukung laju infiltrasi tinggi (98,4 mm/jam), melebihi batas EPA, menjadikannya cocok untuk wilayah tropis yang rentan banjir. Paving ini tidak hanya berfungsi sebagai struktur permukaan, tetapi juga sebagai infrastruktur hijau yang mampu mengurangi limpasan air hujan dan meningkatkan resapan ke dalam tanah.

Penerapan material paving berbasis muatan lokal ini berpotensi memperkuat ketahanan iklim kota, mendukung visi pembangunan rendah karbon, dan memberikan nilai tambah ekonomi melalui pemanfaatan sumber daya lokal. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mendukung integrasi teknologi

paving berpori dalam kebijakan pembangunan infrastruktur berkelanjutan di wilayah perkotaan Sulawesi Selatan dan sekitarnya.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, M., & Hashim, R. (2018). *Utilization of natural fibers as sustainable building materials: A review. Construction and Building Materials*, Volume 41, Halaman 878 – 885.

Amran, Y. M., Farzania, N., & Ali, A. A. A. (2019). *Properties and applications of foamed concrete; a review. Construction and Building Materials*, Volume 101, Halaman 990 – 1005.

Bina Marga. (2021). Spesifikasi teknis paving block untuk lalu lintas ringan. Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

BPS Sulawesi Selatan. (2023). Statistik Provinsi Sulawesi Selatan 2023. Badan Pusat Statistik Provinsi Sulawesi Selatan.

Fitria, R., Santosa, H., & Lestari, A. (2021). Desain green corridor berbasis paving block berpori pada kawasan perkotaan. *Jurnal Lanskap Perkotaan*, Volume 5 Nomor 1, Halaman 21 – 34.

Ghafoori, N., & Dutta, S. (2019). *Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 7 Nomor 3, Halaman 183 – 191.

Kurniawan, Y., & Nugroho, H. (2020). Pengaruh Penambahan Serbuk Marmer Terhadap Sifat Mekanik Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, Volume 9 Nomor 2, Halaman 98 – 105.

Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2018). *Materials for Civil and Construction Engineers (4th ed.)*. Pearson.

Mulyono, T. (2004). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Andi.

Putri, R., & Wulandari, S. (2019). Pemanfaatan serat ijuk sebagai bahan penguat pada paving block berpori. *Jurnal Teknologi Konstruksi*, Volume 7 Nomor 2, Halaman 45 – 53.

Rahman, M. A., & Khan, M. N. N. (2020). *Development of eco-friendly concrete incorporating marble dust and natural fibers. Sustainable Environment Research*, Volume 30 Nomor 1, Halaman 1 – 10.

Rahmawati, I., & Ardi, B. (2021). Infrastruktur hijau berbasis infiltrasi untuk penangan limpasan air hujan di kota tropis. *Jurnal Tata Ruang Tropis*, Volume 9 Nomor 2, Halaman 45 – 58.

SNI 03-0691-1996. (1996). *Tata Cara Perencanaan Beton untuk Perkerasan Jalan*. Badan Standardisasi Nasional.

Setiawan, A.; Pratama, D.; & Siregar, Y. (2020). Fungsi ganda paving berpori sebagai penutup permukaan dan drainase mikro. *Jurnal Infrastruktur Hijau*, Volume 7 Nomor 2, Halaman 55 – 63.

Subakti, D., Hartono, T., & Wijaya, P. (2022). Penggunaan pasir dan limbah marmer sebagai agregat pada paving block berpori. *Jurnal Teknologi Konstruksi*, Volume 10 Nomor 2, Halaman 77 – 85.

Suratman, A., & Fitriani, R. (2022). Pemanfaatan limbah marmer sebagai bahan substitusi semen pada paving block. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, Volume 6 Nomor 1, Halaman 23 – 30.

Sutanto, R., Pradana, M., & Lestari, D. (2023). Kolaborasi multi pihak dalam pengembangan paving ramah lingkungan. *Jurnal Kebijakan Infrastruktur Berkelanjutan*, Volume 2 Nomor 1, Halaman 1 – 12.

Yuliani, D., Saputra, M., & Rahman, T. (2020). Pemanfaatan material lokal dalam pembangunan infrastruktur berkelanjutan. *Jurnal Pemberdayaan Masyarakat*, Volume 5 Nomor 1, Halaman 41 – 50.