

Pengaruh Biochar Sebagai Bahan Tambah Berkelanjutan untuk Peningkatan Kinerja *Paving Block*

M. Jabir*, Adnan, Gina Aulia*, Rahmawati

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Parepare, Sulawesi Selatan
*Koresponden mail: ginaauliazahrani@gmail.com, muhjabirmuhammadiyah@gmail.com

Diterima: 17 Juni 2026

Setuju: 26 Juni 2026

Abstrac

This study aims to analyze the effect of biochar addition on the compressive strength and water absorption of paving blocks and to determine the optimum variation. The research method employed a quantitative experimental approach with biochar variations of 0%, 1%, 3%, and 5% by cement weight. Paving block specimens measuring 21 cm × 10 cm × 8 cm were tested at the ages of 7, 14, and 28 days using a Compression Testing Machine (CTM) and water absorption testing based on SNI 03-0691-1996. The results showed that the addition of biochar affected the quality of the paving blocks. The 1% biochar variation produced the best performance at 28 days, with a compressive strength of 22.063 MPa and a water absorption value of 7.3%. These values met Grade B requirements based on SNI standards for compressive strength and approached Grade B requirements for water absorption. Biochar additions above 1% led to a decrease in performance due to increased mixture porosity. Therefore, biochar has the potential to be used as an environmentally friendly additive to support sustainable construction.

Kata Kunci: *biochar; paving block; compressive strength; water absorption; sustainable construction*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan biochar terhadap kuat tekan dan daya serap air paving block serta menentukan variasi optimum. Metode penelitian menggunakan eksperimen kuantitatif dengan variasi biochar 0%, 1%, 3%, dan 5% dari berat semen. Benda uji paving block berukuran 21 cm × 10 cm × 8 cm diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari menggunakan Compression Testing Machine (CTM) dan pengujian daya serap air berdasarkan SNI 03-0691-1996. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan biochar berpengaruh terhadap kualitas paving block. Variasi biochar 1% menghasilkan kinerja terbaik pada umur 28 hari dengan kuat tekan sebesar 22,063 MPa dan daya serap air sebesar 7,3%. Nilai tersebut memenuhi mutu B berdasarkan SNI untuk kuat tekan dan mendekati mutu B untuk daya serap air. Penambahan biochar di atas 1% menyebabkan penurunan performa akibat meningkatnya porositas campuran. Dengan demikian, biochar berpotensi digunakan sebagai bahan tambah ramah lingkungan untuk mendukung konstruksi berkelanjutan.

Kata kunci: *biochar; paving block; kuat tekan; penyerapan air; konstruksi berkelanjutan.*

1. Pendahuluan

Perkembangan pesat di sektor infrastruktur dan konstruksi secara global telah memicu lonjakan permintaan terhadap berbagai variasi material bangunan yang memiliki durabilitas tinggi, efisiensi biaya, dan kemudahan dalam aplikasi lapangan. Salah satu elemen konstruksi pracetak non-struktural yang memiliki cakupan utilitas sangat luas di lingkungan perkotaan maupun pedesaan adalah bata beton atau yang lebih dikenal luas sebagai *paving block*. Paving block memiliki sifat yang unik yaitu jika terpasang hanya satu maka menimbulkan sifat yang kaku dan jika dipasang saling mengunci maka akan bersifat lentur [1]. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-0691-1996, *paving block* didefinisikan sebagai suatu komposisi bahan bangunan yang difabrikasi dari campuran semen Portland atau bahan perekat hidrolis sejenisnya, air, dan agregat halus, dengan atau tanpa tambahan bahan lainnya yang tidak mengurangi mutu bata beton tersebut [2].

Pemanfaatan material ini mencakup perkerasan trotoar di kawasan komersial, jalan-jalan di kompleks perumahan yang menuntut nilai estetika tinggi, perkerasan area parkir kendaraan ringan hingga berat, pelabuhan peti kemas, hingga kawasan industry [3]. Namun, terlepas dari berbagai keunggulan fungsionalnya, performa *paving block* sangat bergantung pada karakteristik mutu mekanis dan fisiknya. *Paving block* yang berkualitas baik ditandai dengan pencapaian nilai kuat tekan (*compressive strength*) yang tinggi serta tingkat penyerapan air (*water absorption*) yang rendah. Salah satu masalah fundamental

yang sering dihadapi dalam pengaplikasian *paving block* di lapangan adalah tingginya tingkat daya serap air pada badan blok itu sendiri, yang seiring berjalannya waktu dapat memicu terjadinya pelapukan, degradasi akibat siklus basah-kering, serta penurunan kapasitas dukung struktural ketika dilintasi beban dinamis secara repetitif.

Secara konvensional, kekuatan dan integritas struktural dari *paving block* sangat bergantung pada proses hidrasi semen Portland. Semen berfungsi sebagai agen pengikat hidrolis utama yang, ketika bereaksi dengan air, akan menghasilkan senyawa Kalsium Silikat Hidrat (C-S-H) yang merekatkan butir-butir agregat halus sehingga membentuk suatu massa padat yang homogen [4]. Akan tetapi, produksi semen Portland merupakan salah satu industri penyumbang emisi gas rumah kaca terbesar di dunia. Proses kalsinasi batu kapur (*calcium carbonate*) menjadi kalsium oksida (*clinker*) melepaskan karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah masif langsung ke atmosfer. Ditambah lagi dengan konsumsi energi fosil yang sangat intensif yang dibutuhkan untuk memanaskan tanur putar pada suhu lebih dari 1400°C. Hal ini berbanding lurus dengan dampak perubahan iklim dan pemanasan global [5].

Selain krisis emisi karbon dari produksi semen, eksploitasi berlebihan terhadap agregat alam juga menjadi isu lingkungan yang tidak kalah mendesaknya. Pengambilan pasir dari dasar sungai dan wilayah pesisir secara terus-menerus untuk memenuhi kebutuhan konstruksi telah menyebabkan degradasi ekosistem akuatik, erosi tepian sungai, intrusi air laut, serta hilangnya habitat keanekaragaman hayati. Penurunan kualitas pasir alam, yang seringkali tercampur dengan lumpur dan zat organik tingkat tinggi, juga dapat mengganggu reaksi hidrasi semen yang pada gilirannya menurunkan durabilitas beton. Oleh karena itu, terdapat urgensi yang sangat tinggi bagi komunitas teknik sipil dan industri material bangunan untuk mengeksplorasi dan berinovasi mengembangkan material konstruksi alternatif yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan (*sustainable*), namun tetap mampu memenuhi parameter standar teknis yang disyaratkan secara ketat.

Di tengah desakan untuk menemukan material aditif yang berkelanjutan, *biochar* muncul sebagai salah satu kandidat material alternatif yang sangat menjanjikan. *Biochar* adalah produk kaya karbon yang dihasilkan dari pemanasan dekomposisi bahan organik dalam lingkungan bersuhu tinggi namun dengan tingkat paparan oksigen yang sangat rendah atau tanpa oksigen sama sekali. Secara esensial, limbah biomassa seperti kayu, tempurung kelapa, tongkol jagung, sekam padi, sisa industri perkayuan, hingga kulit buah kacang-kacangan dapat diolah melalui proses pirolisis menjadi arang hayati atau *biochar* [6].

Keistimewaan krusial dari *biochar* terletak pada efektivitas kemampuannya untuk mengikat dan menahan karbon dalam jangka waktu yang lama. Panel Kementerian Lingkungan Hidup / Badan Pengendalian Lingkungan Hidup menyatakan bahwa setiap butir *biochar* berperan sebagai "brankas karbon" yang krusial untuk membantu memperlambat laju perubahan iklim global [7]. Penerapan sistem *biochar* secara ekstensif bahkan dilaporkan sanggup menghasilkan reduksi penarikan emisi karbon sebesar 3,4 hingga 6,3 Pg CO₂ eq secara global. Selain peran makroekologis tersebut, *biochar* memiliki karakteristik unik berupa struktur berpori internal yang sangat tinggi, luas permukaan yang besar, serta kapasitas menahan air (*water retention*) dan kapasitas adsorpsi yang sangat baik. Karakteristik fisikokimia ini diketahui mampu memengaruhi kinetika reaksi hidrasi semen secara langsung, serta merekonstruksi struktur mikro komposit beton apabila ditambahkan ke dalam campuran material bangunan. Fraksi debu *biochar* yang dihaluskan hingga lolos kualifikasi saringan No. 100 (atau dimensi 0,15 mm) memiliki kemampuan teoretis untuk bertindak sebagai material pengisi (*micro-filter*) yang efisien guna menutupi jaringan pori-pori kapiler mikro pada pasta semen pembentuk blok beton.

Sejumlah penelitian global berskala mutakhir telah menguji kelayakan integrasi *biochar* ke dalam sistem matriks komposit bahan berbasis semen. Sebuah tinjauan komprehensif oleh Zhang et al. (2022) mengonfirmasi bahwa struktur pori kapiler dan profil sifat kimia molekuler dari *biochar* menjadikannya sebagai komponen material pendukung konstruksi netral karbon yang sangat prospektif [8]. Di sisi uji mekanik, Rashid et al. (2024) mengeksplorasi perbandingan komposit semen yang diperkaya dengan dua varian *biochar*, yakni *jungle keekar* (JK) dan arang jerami padi (RS). Analisis mereka mendemonstrasikan secara empiris bahwa substitusi *biochar* RS mampu mendorong spesimen mortar untuk melampaui kekuatan tekan campuran kontrol hingga 23,07% pada usia pengawetan 28 hari. Meski demikian, kajian tersebut juga memberikan peringatan bahwa mortar *biochar* rentan mencatatkan indeks penyerapan air yang membengkak, terutama pada dosis aplikasi tertentu [9].

Dukungan teknis lainnya terpetakan secara jelas melalui meta-analisis berskala besar oleh Zhao et al. (2024) yang mengobservasi komparasi 606 parameter berpasangan dari beragam literatur. Analisis mendalam mereka menyimpulkan bahwa serbuk arang *biochar* berbasis nabati—terlebih jika diproduksi melalui laju panas pirolisis di atas 450°C—terbukti efektif meningkatkan rentang kuat tekan silinder beton sebesar 3% sampai 13% pada maturasi 28 hari. Lebih lanjut ditekankan bahwa untuk menjaga rasio efisiensi

ini, batasan dosis serapan *biochar* idealnya ditahan di bawah margin 2,5% dari bobot pengikat hidrolis (semen) total [10].

Terkait perkerasan secara spesifik, Paoleng et al. (2025) berhasil mendemonstrasikan kelayakan pencetakan *paving block* sirkular melalui penggunaan gabungan substitusi limbah plastik *polypropylene* (PP) dan arang *biochar*. Modifikasi blok dengan kandungan pengikat majemuk 5% *biochar* dan 2% partikel PP sukses mencatatkan titik hancur di angka 52,11 MPa, yang merepresentasikan kelayakan praktis arang ini dalam menyubstitusi semen tanpa mengorbankan keamanan mekanik elementer *paving block* [11]. Walau menjanjikan kuat tekan awal, tinjauan Abbas & Thapa (2025) menggarisbawahi paradoks porositas *biochar*, di mana pada tingkat penggantian volume yang masif (seperti 15% hingga 60%), *biochar* justru mengacaukan viskositas *workability* adukan basah dan memangkas kurva kekuatan mekanik material akibat tingginya retensi air pori [12].

Meskipun pemahaman akademis mengenai potensi *biochar* pada campuran beton struktural telah mengalami eskalasi tajam di Indonesia, eksekusi praktis material ini pada cetakan pracetak non-struktural yang dikhususkan untuk durabilitas eksterior seperti *paving block* sesungguhnya masih sangat minim. Kesalahan konseptual dari literatur-literatur pendahulu seringkali berakar dari determinasi teknis yang memaksakan *biochar* murni sebagai substitusi (pengganti sebagian volumetrik semen murni), alih-alih mengeksploitasinya sebagai *additive* murni. Kondisi ini yang sering memicu krisis hidrasi semen dan penurunan kekuatan drastis saat substitusi berada dalam proporsi asimetris [13].

Kajian eksperimental ini secara tegas menambahkan *biochar* sebagai bahan tambah (*additive*), bukan sebagai substitusi (pengganti) semen atau pasir. *Biochar* ditambahkan dalam rasio yang termoderasi dengan ketat pada persentase 0%, 1%, 3%, dan 5% dari berat semen yang digunakan, dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan limbah *biochar* terhadap daya serap air dan kuat tekan *paving block*. Hasil penelitian diharapkan mampu menghasilkan *paving block* yang memenuhi standar mutu SNI 03-0691-1996 sekaligus mendukung pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah biomassa.

2. Metode penelitian

Proses pelaksanaan penelitian dilakukan selama ± 2 bulan. Dengan urutan atau tahapan pekerjaan sebagai berikut, yaitu dimulai dari mempersiapkan material, menguji karakteristik material, kemudian membuat benda uji *paving block*, merawat atau *curing* benda uji, dan menguji kuat tekannya.

2.1 Bahan-Bahan

Berbagai macam bahan yang dipakai antara lain sebagai berikut: a). Agregat halus, pasir diambil dari Kabupaten Pinrang. b). Semen, yang digunakan semen PCC dengan merek dagang “Tonasa”. c). Limbah *biochar*, diambil dari Kabupaten Pinrang. d). Air, menggunakan sumur bor yang ada di Universitas Muhammadiyah Parepare.

2.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan *paving block* yang memiliki ukuran 21 x 10 x 8 cm. Mutu beton akan didesain dengan kuat rencana ($f'c$) sebesar 20 Mpa. Beton mengalami 4 (empat) perlakuan yaitu menambah kebutuhan semen sesuai *mix design* dengan limbah *biochar* berturut-turut sebesar 0%, 1%, 3%, dan 5%. Proses pencetakan *paving block* harus dibuat dengan cepat agar adonan tidak cepat kering [14]. Masing-masing campuran dibuat sebanyak tiga benda uji dan diuji penyerapan air dan kuat tekan saat beton mencapai umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Secara lebih jelas, rencana rancangannya ada pada **Tabel 1** berikut.

Tabel 1. Rancangan benda uji

Jenis Sampel	Kuat tekan		
	7	14	28
Beton normal	3	3	3
Beton dengan campuran <i>biochar</i> 1%	3	3	3
Beton dengan campuran <i>biochar</i> 3%	3	3	3
Beton dengan campuran <i>biochar</i> 5%	3	3	3
Total	36		

2.3 Pengujian Daya Serap Air

Pengujian daya serap air dilakukan untuk menilai tingkat penyerapan air pada *paving block* melalui struktur porinya. Pengujian ini berdasarkan SNI 03-0691-1996 tentang bata beton (*paving block*). Tempat

pelaksanaan di Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Parepare. **Gambar 1** menunjukkan foto Oven yang digunakan untuk mengeringkan benda uji.



Gambar 1. Oven

Sedangkan persamaan yang digunakan untuk menentukan daya serap air adalah sebagai berikut:

$$\text{Daya serap air} = \frac{B-A}{A} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

A : Berat kering

B : Berat setelah perendaman

2.4 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan pada beton dimaksudkan agar nilai kuat tekan hancurnya dapat ditentukan. *Paving block* yang dibuat harus cukup kuat dalam menahan beban tekanan karena ini merupakan sebagai salah satu syarat utama dan sesuai dengan kebutuhan pekerjaan dan juga kekuatan didapatkan dari perbandingan adukan [15]. Pengujian ini menggunakan SNI 03-0691-1996 tentang bata beton (*paving block*). tempat pelaksanaan di Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Parepare. **Gambar 2** menunjukkan foto alat uji kuat tekan yang digunakan.



Gambar 2. Alat uji kuat tekan beton

Sedangkan persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai kuat tekan Adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (2)$$

dengan:

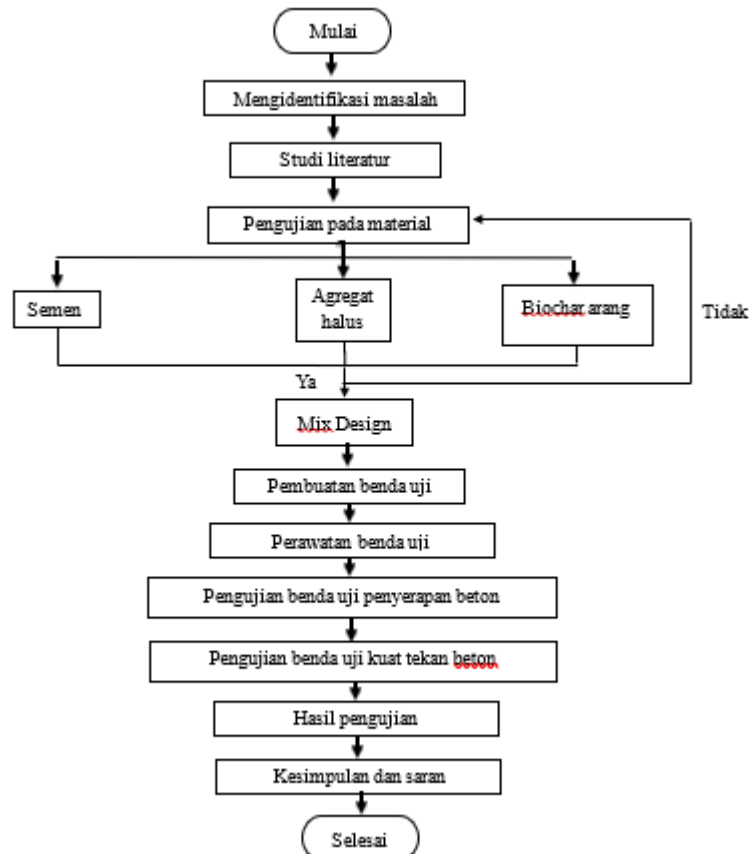
σ : Kuat tekan beton dalam MPa

P : Gaya tekan dalam N

A : Luas penampang melintang benda uji dalam mm²

2.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dimulai dengan menyiapkan alat dan bahan yang diperlukan, kemudian melakukan pengujian karakteristik material yang meliputi pengujian kadar air, kadar lumpur, kadar organik, gradasi agregat, serta berat jenis dan berat volume pada agregat halus dan biochar. Selanjutnya merencanakan *mix design* guna menghasilkan campuran benda uji beton yang diinginkan. Setelah itu, dilakukan pengujian daya serap air dan kuat tekan pada beton saat mencapai umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Diagram alir atau *flowchart* ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Diagram alir (*flowchart*) pengujian

3. Hasil dan pembahasan

3.1 Hasil Pengujian Karakteristik Material

Hasil dari pengujian karakteristik material penyusun beton yang meliputi pasir dan limbah biochar dapat dibaca pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Tabel 2. Hasil pengujian agregat halus

No.	Karakteristik Agregat	Interval	Hasil Pengamatan		Nilai rata-rata	Keterangan
			I	II		
1.	Kadar lumpur	Maks 5%	5,3%	4,0%	4,66%	Memenuhi
2.	Kadar organik	<No. 3	No. 2	No. 2	No. 2	Memenuhi
3.	Kadar air	2% - 5%	3,97%	3,73%	3,85%	Memenuhi
4.	Berat volume					
	a. Kondisi lepas	1,4 - 1,9 kg/liter	1,50	1,50	1,50	Memenuhi
	b. Kondisi padat	1,4 - 1,9 kg/liter	1,51	1,51	1,51	Memenuhi
5.	Absorpsi	0,2% - 2%	2,19%	1,40%	1,79%	Memenuhi
6.	Berat jenis spesifik					
	a. Bj. nyata	1,6 - 3,3	2,58	2,84	2,71	Memenuhi
	b. Bj. dasar kering	1,6 - 3,3	2,44	2,73	2,59	Memenuhi
	c. Bj. kering permukaan	1,6 - 3,3	2,49	2,77	2,63	Memenuhi
7.	Modulus kehalusan	1,50 - 3,80	2,71	2,59	2,65	Memenuhi

Tabel 3. Hasil pengujian biochar

No.	Karakteristik Agregat	Hasil Pengamatan		Nilai rata-rata	Keterangan
		I	II		
1.	Berat volume				
	a. Kondisi lepas	0,45	0,45	0,45	Memenuhi
	b. Kondisi padat	0,36	0,36	0,36	Memenuhi
2.	Berat jenis spesifik	1,71	1,71	1,71	Memenuhi

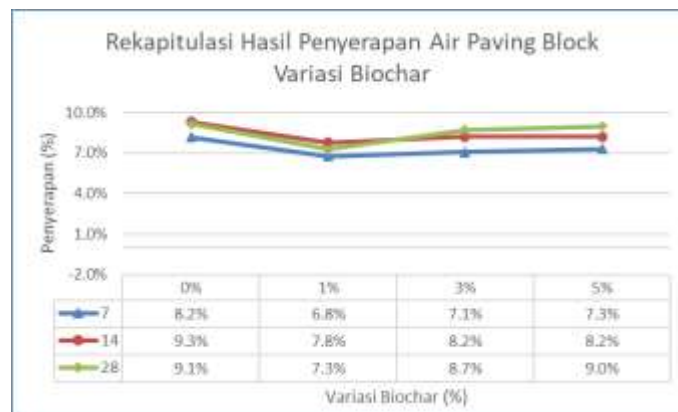
Pasir dan limbah biochar masih dalam syarat ketentuan bahan campuran beton apabila kita lihat dari nilai pada tabel diatas.

3.2. Hasil Pengujian Penyerapan Air *Paving Block*

Pengujian penyerapan air pada *paving block* dengan bahan tambah biochar dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam oven selama 24 jam di suhu 105° pada saat umur beton 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Adapun hasil pemeriksaan tersebut ditampilkan pada **Tabel 4** berikut ini.

Tabel 4. Hasil pengujian penyerapan air rata-rata

Umur (hari)	Penyerapan Air (%)			
	0%	1%	3%	5%
7	8.2%	6.8%	7.1%	7.3%
14	9.3%	7.8%	8.2%	8.2%
28	9.1%	7.3%	8.7%	9.0%



Gambar 4. Grafik hasil pengujian penyerapan air

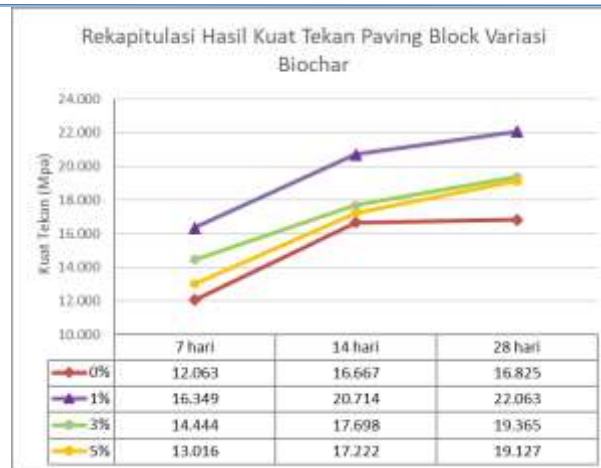
Berdasarkan **Gambar 4** di atas menunjukkan bahwa penyerapan air pada penambahan biochar 1% memberikan hasil terbaik dengan nilai rata-rata penyerapan air terendah jika dibandingkan dengan variasi 0% (beton normal), yaitu pada umur 7 hari sebesar 6,8%, pada umur 14 hari sebesar 7,8%, dan pada umur 28 hari sebesar 7,3%. Yang mana ini menandakan bahwa struktur *paving block* menjadi lebih padat dan mengalami peningkatan kualitas karena pori-pori yang lebih sedikit.

3.3. Hasil Pengujian Kuat Tekan *Paving Block*

Pengujian kuat tekan dilakukan dengan *Compressive Strength Test* pada saat umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Nilai kuat tekan yang ditampilkan pada **Tabel 5** merupakan hasil dari rata-rata tiga benda uji di setiap masing-masing variasi.

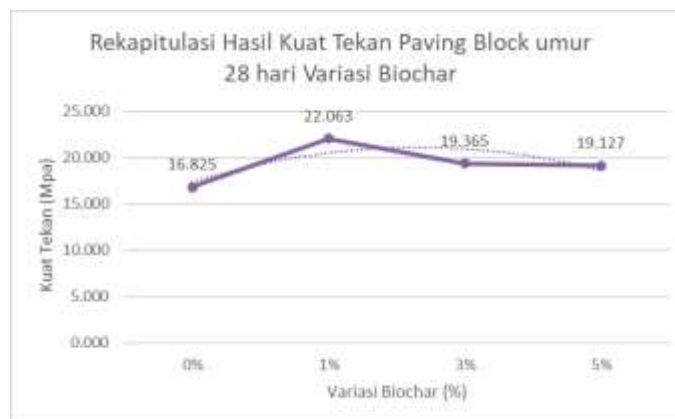
Tabel 5. Hasil nilai kuat tekan rata-rata

Umur (hari)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)			
	0%	1%	3%	5%
7	12.063	16.349	14.444	13.016
14	16.667	20.714	17.698	17.222
28	16.825	22.063	19.365	19.127



Gambar 5. Grafik hasil pengujian kuat tekan

Gambar 5 menunjukkan peningkatan kuat tekan di setiap variasi penambahan biochar terhadap semen pada saat umur beton 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Terlihat peningkatan yang terjadi cukup besar jika dibandingkan dengan variasi 0% (beton normal).



Gambar 6. Grafik hasil pengujian kuat tekan paving block umur 28 hari

Berdasarkan grafik yang tergambar dalam Gambar 6, besar kuat tekan rata-rata umur 28 hari pada paving block dengan variasi 0% adalah sebesar 16,825 MPa, pada variasi 1% adalah sebesar 22,063 MPa, yang merupakan kuat tekan tertinggi, dan pada paving block variasi 3% mengalami penurunan menjadi 19,365 MPa, serta pada variasi 5% juga mengalami penurunan menjadi 19,127 MPa.

4. Kesimpulan

Dari penelitian yang sudah dilaksanakan didapatkan kesimpulan bahwa penambahan limbah biochar dengan persentase tertentu dapat meningkatkan kuat tekan pada paving block, serta menjadikan paving block lebih kedap air, ini dikarenakan biochar berfungsi sebagai filler. Kondisi yang paling optimum dari penambahan biochar pada semen di tinjau dari penyerapan air dan kuat tekan pada penelitian ini terjadi pada persentase 1%.

5. Referensi

- [1] M. H. Dermawan, "Model Kuat Tekan, Porositas Dan Ketahanan Aus Proporsi Limbah Peleburan Besi Dan Semen Untuk Bahan Dasar Paving block," *J. Tek. Sipil dan Perenc.*, vol. 13, no. 1, hal. 41–50, 2011.
- [2] B. S. N. (BSN), "Bata Beton (Paving Block)," *Sni 03-0691-1996*, hal. 1–9, 1996, [Daring]. Tersedia pada: https://spada.uns.ac.id/pluginfile.php/110917/mod_resource/content/1/sni-03-0691-1996-paving-block.pdf
- [3] K. I. Sari dan A. B. Nusa, "Pemanfaatan Limbah Plastik Hdpe (High Density Polythylene) Sebagai Bahan Pembuatan Paving Block," *Cetak) Bul. Utama Tek.*, vol. 15, no. 1, hal. 1410–4520, 2019.
- [4] K. M. Mbuh, N. L. Nsahlai, B. J. Penka, dan C. P. Fru, "Analysis of the influence of water qualities on the strength of concrete," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 71, no. 1, hal. 1–14, 2024, doi: 10.1186/s44147-024-00432-8.

- [5] SNI 15-7064-2004, “Semen Portland Komposit,” *Badan Stand. Nas.*, hal. 1–128, 2004.
- [6] S. Tarigan, T. Aznur, dan R. Umami, “Efektivitas Aplikasi Biochar Tempurung Kelapa Pada Media Tanam Terhadap Pertumbuhan Dan Serapan Hara N Di Pembibitan Utama Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.),” *J. Agro Estate*, vol. 5, hal. 110–121, Des 2021, doi: 10.47199/jae.v5i2.94.
- [7] S. Lathif, “Jejak Karbon yang Terkunci: Biochar dan Perjalanan Menuju Pasar Karbon Dunia | Kementerian Lingkungan Hidup / Badan Pengendalian Lingkungan Hidup.” Diakses: 12 Januari 2026. [Daring]. Tersedia pada: <https://kemenlh.go.id/news/detail/jejak-karbon-yang-terkunci-biochar-dan-perjalanan-menuju-pasar-karbon-dunia>
- [8] Y. Zhang *et al.*, “Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality,” *Biochar*, vol. 4, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s42773-022-00182-x.
- [9] S. Rashid, A. Raghav, A. Goyal, D. R. AB, dan M. Singh, “Biochar as a sustainable additive in cementitious composites: a comprehensive analysis of properties and environmental impact,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 209, hal. 118044, 2024.
- [10] Z. Zhao, A. El Naggar, J. Kau, C. Olson, D. Tomlinson, dan S. X. Chang, “Biochar affects compressive strength of Portland cement composites : a meta - analysis,” *Biochar*, 2024, doi: 10.1007/s42773-024-00309-2.
- [11] P. Paoleng, S. Ongsomsaksakul, I. Meepon, dan S. Maneekaew, “Application Of Biochar As Partial Cement Replacement With,” vol. 54, no. 5, hal. 4978–4991, 2025, doi: <https://doi.org/10.48047/vmsxaq82>.
- [12] A. A. Abbas dan S. J. Thapa, “Experimental Investigation of Low-Carbon Concrete Using Biochar as Partial Cement Replacement,” 2025. doi: 10.3390/su172310744.
- [13] S. H. Mahi, A. Mun-im-dinar, dan T. A. Ridoy, “Biochar as a Sustainable Cement Replacement for Enhancing Concrete Composite Properties : A Review,” vol. 2, no. 1, hal. 1–10, 2025.
- [14] S. Asnur dan A. Setiawan, “Sosialisasi pembuatan paving block dari limbah plastik berbasis pemberdayaan masyarakat di Kota Makassar,” *Dedikasi*, vol. 22, no. 1, hal. 2–5, 2020, doi: 10.26858/dedikasi.v22i1.13811.
- [15] Rahmi Yanita. Gufron Andreas, “Manfaat Faktor Konversi Paving Block.pdf,” 2017.