

# Studi Pengaruh Nano Silika Sebagai Bahan Tambah Pada Paving Block Ditinjau Dari Kuat Tekan dan Penyerapan Air

Usnul Khatimah\*, Mustakim, Imam Fadly

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Parepare, Sulawesi Selatan

\*Koresponden email: snulhusnul151@gmail.com

Diterima: 27 Agustus 2025

Disetujui: 11 September 2025

## Abstract

Paving blocks are paving materials that are widely used because they are efficient and environmentally friendly. Their quality is greatly influenced by compressive strength and water absorption. The addition of nano silica as an additive has the potential to improve the performance of paving blocks, because the very fine particle size is able to fill the micro pores of concrete, increase density, and strengthen the structure of the material. This study aims to determine the effect of adding nano silica on the compressive strength and water absorption of paving blocks using experimental methods. Based on the results of the study, the addition of nano silica has a positive effect on the compressive strength and water absorption of paving blocks. The higher the percentage of nano silica, the higher the compressive strength produced. The compressive strength increased from 20.35 MPa in normal paving blocks to 25.85 MPa in a mixture with 3% nano silica. Conversely, the water absorption rate decreased from 20.40% (without nano silica) to 11.02% in a mixture with 3% nano silica. This shows that the addition of nano silica can increase the strength and reduce the porosity of paving blocks.

**Keywords:** *compressive strength, nano silica, paving block, water absorption*

## Abstrak

Paving block merupakan material perkerasan yang banyak digunakan karena efisien dan ramah lingkungan. Kualitasnya sangat dipengaruhi oleh kuat tekan dan daya serap air. Penambahan nano silika sebagai bahan tambah berpotensi meningkatkan performa paving block, karena ukuran partikelnya yang sangat halus mampu mengisi pori-pori mikro beton, meningkatkan kepadatan, serta memperkuat struktur material. Studi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan nano silika terhadap kuat tekan dan penyerapan air paving block dengan menggunakan metode eksperimental. Berdasarkan hasil penelitian, penambahan nano silika berpengaruh positif terhadap kuat tekan dan daya serap air paving blok. Semakin tinggi persentase nano silika, semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan. Kuat tekan meningkat dari 20,35 MPa pada paving blok normal menjadi 25,85 MPa pada campuran dengan 3% nano silika. Sebaliknya, tingkat penyerapan air menurun dari 20,40% (tanpa nano silika) menjadi 11,02% pada campuran dengan 3% nano silika. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan nano silika dapat meningkatkan kekuatan serta mengurangi porositas paving blok.

**Kata Kunci:** *kuat tekan, nano silika, paving block, penyerapan air*

## 1. Pendahuluan

Paving block telah menjadi material penting dalam pembangunan infrastruktur perkotaan, terutama di jalan setapak dan trotoar, karena keunggulannya dalam aspek estetika dan kemudahan pemasangan. Namun, tantangan utama terkait dengan kekuatan tekan dan penyerapan air yang tinggi masih perlu diatasi, yang dapat berimplikasi pada kerusakan dini dan meningkatnya biaya pemeliharaan [1], [2]. Penggunaan material inovatif seperti nano silika dalam campuran paving block dapat meningkatkan performa beton, di mana peningkatan kepadatan dan pengurangan porositas dapat berhasil meningkatkan karakteristik mekanisnya [3].

Dalam konteks keberlanjutan, penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bahan pembuangan seperti material sampah, termasuk bottom ash atau crumb rubber, memperlihatkan potensi untuk menghasilkan paving block yang lebih ramah lingkungan dan berfungsi dengan baik [4][5]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa agregat daur ulang dari beton yang dihancurkan dapat digunakan untuk memproduksi paving block, memberi kontribusi pada pengelolaan limbah yang lebih baik dan efisiensi material dalam konstruksi [6]. Inovasi ini sangat penting dalam menghadapi permasalahan perubahan iklim dan permintaan konstruksi yang berkelanjutan.

Industri semen menyumbang sekitar 8% dari total emisi CO<sub>2</sub> global, yang menyiratkan dampak signifikan terhadap lingkungan [7]. Proses produksi semen, terutama melalui pembakaran klinker, menghasilkan emisi karbon yang besar dan berkontribusi pada kerusakan lingkungan [8]. Ini menyoroti urgensi untuk mencari inovasi material yang dapat mengurangi penggunaan semen saat menjaga kualitas produk konstruksi [9]. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah penggunaan nano silika sebagai bahan tambah dalam campuran paving block. Penelitian menunjukkan bahwa nano silika tidak hanya dapat meningkatkan karakteristik mekanis beton, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan jejak karbon dalam konstruksi [10]. Selain itu, inovasi seperti penggunaan campuran semen yang lebih ramah lingkungan telah terbukti mengurangi dampak lingkungan secara signifikan, mencapai penghematan hingga 13% dalam produksi melalui aditif berbasis limbah [11]. Inisiatif semacam ini sangat mendukung agenda global untuk pembangunan berkelanjutan dan rendah karbon.

Masalah utama dalam pengembangan paving block berfokus pada peningkatan kualitas, terutama pada aspek kuat tekan dan daya serap air, tanpa menambah dampak lingkungan. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan silika fume dalam campuran beton dapat meningkatkan kuat tekan. Sebagai contoh, penelitian oleh Chaudhary dan Sinha menunjukkan bahwa penambahan silika fume dapat menurunkan permeabilitas dan meningkatkan kekuatan mekanis beton [12]. Penelitian lain yang dilakukan oleh Abed et al. juga menyatakan bahwa optimalisasi kadar silika fume pada campuran beton dapat memperbaiki sifat mekanis [13]. Di sisi lain, penambahan silika fume juga berkontribusi terhadap pengurangan daya serap air. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar silika fume dapat mengurangi permeabilitas dan daya serap air, yang berimplikasi pada peningkatan durability (Farahani et al., 2023). Hal ini penting karena paving block yang memiliki tingkat penyerapan tinggi dapat rentan terhadap kerusakan dan meningkatkan biaya pemeliharaan [14]. Dengan demikian, penelitian ini berupaya untuk mengeksplorasi manfaat penggunaan silika fume sebagai solusi bertanggung jawab secara lingkungan untuk memenuhi kebutuhan material konstruksi yang kuat dan tahan lama.

Optimalisasi penggunaan nano silika dalam campuran beton menunjukkan hasil yang menjanjikan, terutama dalam meningkatkan kekuatan material. Ukuran partikel nano silika yang sangat halus memungkinkan ia untuk mengisi pori-pori mikro dalam beton, yang secara efektif meningkatkan ikatan antar partikel semen [15]. Reaksi pozolanik antara nano silika dan kalsium hidroksida menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan tekan beton. Hal ini menunjukkan potensi nano silika bukan hanya sebagai bahan tambahan, tetapi juga sebagai inovasi yang dapat mengatasi keterbatasan beton konvensional. Strategi pemanfaatan ini dapat diintegrasikan dengan material alternatif lainnya untuk menambah keberlanjutan dalam konstruksi [16]. Penerapan nano silika dalam campuran memberikan jalan bagi pengembangan produk beton yang lebih efisien dan ramah lingkungan, walaupun perlu diingat bahwa penelitian juga menunjukkan perbedaan efektivitas material alternatif lainnya [17].

Penelitian empiris menunjukkan bahwa variasi komposisi pasir dan semen secara signifikan memengaruhi kekuatan tekan paving block, meskipun tingkat penyerapan air tetap tinggi. Komposisi campuran berhubungan erat dengan kekuatan tekan dan penyerapan air, menyiratkan pentingnya formulasi yang tepat [18]. Selain itu, studi oleh Polat (2021) menunjukkan bahwa penggunaan bahan alternatif seperti kerikil jagung dapat mengoptimalkan daya tekan beton pada kadar tertentu. Temuan ini secara kolektif mendukung pencarian berkelanjutan untuk material tambahan yang efektif dalam meningkatkan sifat mekanik beton, serta memberikan alternatif yang berkelanjutan untuk konstruksi [19]. Penelitian mengenai penggunaan nano silika dalam campuran beton menunjukkan hasil yang positif dari segi peningkatan sifat mekanis dan ketahanan lingkungan. Alhawat et al (2019) menyatakan bahwa penambahan nano silika secara signifikan mampu memperbaiki kuat tekan dan daya tahan beton terhadap faktor lingkungan [20]. Selain itu, Alqamish dan Al-Tamimi (2021) juga menjelaskan bahwa nano silika berfungsi sebagai pengurang porositas dan peningkatan homogenitas dalam struktur beton modern, sehingga meningkatkan kualitas keseluruhan [21]. Namun, studi oleh Hassan et al (2016) menunjukkan bahwa efektivitas nano silika dapat bervariasi tergantung pada konsentrasi dan jenisnya [22]. Kesimpulan ini menunjukkan bahwa penggunaan nano silika didukung oleh bukti empiris yang mendalam mengenai efektivitasnya dalam meningkatkan performa beton.

Namun, meskipun terdapat berbagai penelitian mengenai substitusi material pada paving block, celah penelitian masih terlihat pada eksplorasi spesifik pengaruh nano silika terhadap kombinasi antara kuat tekan dan penyerapan air secara bersamaan. Sebagian besar penelitian terdahulu cenderung berfokus pada satu aspek, misalnya kuat tekan saja atau daya serap air saja, sehingga integrasi kedua variabel ini dalam konteks nano silika masih jarang diteliti secara mendalam. Hal ini membuka ruang kontribusi baru bagi penelitian ini, terutama dalam menyajikan data empiris yang dapat menginformasikan praktik konstruksi

berkelanjutan. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh penambahan nano silika terhadap kuat tekan dan penyerapan air paving block. Kebaruan penelitian terletak pada pendekatan simultan terhadap kedua variabel kunci tersebut dalam konteks penggunaan nano silika dengan variasi konsentrasi tertentu, sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai potensi aplikatif nano silika. Justifikasi hipotesis didasarkan pada temuan bahwa semakin tinggi kadar nano silika dalam campuran, semakin besar potensi peningkatan kuat tekan sekaligus penurunan tingkat penyerapan air akibat menurunnya porositas material. Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada penggunaan semen Portland Composite Cement (PCC), standar pengujian SNI 1974:2011 untuk kuat tekan, dan SNI 03-2492-1991 untuk penyerapan air, dengan variasi penambahan nano silika 0%, 1%, 2%, dan 3%. Dengan batasan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan kontribusi empiris sekaligus praktis yang signifikan dalam memperkuat literatur mengenai inovasi material konstruksi ramah lingkungan.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen, penelitian kuantitatif menuntut penggunaan data numerik yang dapat diolah secara statistik untuk memperoleh kesimpulan objektif. Pendekatan ini relevan karena tujuan penelitian adalah menguji pengaruh penambahan nano silika terhadap kuat tekan dan penyerapan air paving block, sehingga dibutuhkan data terukur yang dapat dibandingkan secara sistematis. Metode eksperimen dipilih karena memungkinkan peneliti mengendalikan variabel bebas dalam hal ini persentase nano silika untuk mengamati perubahan yang terjadi pada variabel terikat, yakni kuat tekan dan daya serap air paving block. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Parepare. Pemilihan laboratorium ini didasarkan pada ketersediaan fasilitas yang memadai untuk melakukan pengujian karakteristik material dan kekuatan beton, termasuk alat uji tekan dan uji daya serap air.

Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan rancangan mix design tertentu. Fokus penelitian adalah membandingkan hasil uji paving block dengan variasi penambahan nano silika 0%, 1%, 2%, dan 3% terhadap berat semen. Penentuan variasi bahan tambahan harus mempertimbangkan batas optimal agar tidak menurunkan sifat dasar beton. Nano silika dipilih karena memiliki sifat pozzolanik yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida untuk menghasilkan C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) yang meningkatkan kekuatan beton. Proses pembuatan benda uji diawali dengan pemeriksaan karakteristik material, termasuk uji kadar lumpur, berat jenis, kadar air, dan modulus kehalusan agregat halus sebagaimana diatur dalam SNI 03-6821-2002. Setelah material dinyatakan memenuhi syarat, dilakukan pencampuran semen, agregat halus, air, dan nano silika sesuai dengan variasi mix design yang telah ditentukan. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam cetakan, dipadatkan, dan dibiarkan mengeras selama satu jam sebelum dilepas dari cetakan. Selanjutnya, benda uji ditempatkan pada area curing dengan kondisi standar, yaitu suhu 20°C dan kelembapan relatif 90%, untuk mencegah retak akibat kehilangan kelembapan berlebih. Variasi yang digunakan terdiri dari 0% (kontrol), 1%, 2%, dan 3% nano silika terhadap berat semen. Jumlah benda uji adalah 40 sampel, dengan masing-masing variasi sebanyak 10 sampel. Pemilihan jumlah sampel ini sejalan dengan prinsip validitas eksperimen yang menyarankan adanya replikasi agar hasil dapat diuji secara konsisten.

Data primer diperoleh dari hasil eksperimen di laboratorium berupa nilai kuat tekan dan persentase daya serap air paving block. Data sekunder dikumpulkan dari literatur terkait, termasuk standar nasional, jurnal penelitian sebelumnya, dan dokumen teknis. Kombinasi data primer dan sekunder ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif, serta memberikan konteks akademik yang kuat terhadap hasil eksperimen. Analisis data dilakukan dengan pendekatan parametrik deskriptif. Data hasil uji kuat tekan dihitung berdasarkan pembagian beban maksimum benda uji dengan luas penampang, sebagaimana ditetapkan dalam SNI 1974:2011. Nilai daya serap air dihitung dengan formula standar  $(W_2 - W_1)/W_1 \times 100\%$ , di mana  $W_1$  adalah berat kering oven dan  $W_2$  adalah berat setelah perendaman. Hasil pengukuran disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi. Selanjutnya, analisis dilakukan untuk membandingkan nilai rata-rata antar variasi nano silika. Dengan demikian, dapat diketahui tren peningkatan atau penurunan pada masing-masing parameter.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian karakteristik material dasar yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan untuk memastikan kesesuaian agregat halus, semen, air, dan nano silika terhadap standar yang berlaku. Agregat halus diuji berdasarkan parameter kadar lumpur, kadar organik, kadar air, berat jenis, berat volume, absorpsi, serta modulus kehalusan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata kadar lumpur sebesar 3,59% masih berada dalam batas maksimum 5% sebagaimana diatur dalam SNI 03-6821-2002. Nilai kadar

organik berada pada standar warna No.1, yang menandakan kadar organik rendah sehingga aman digunakan. Berat jenis agregat halus rata-rata sebesar 2,53 dengan kondisi kering permukaan (SSD) memenuhi syarat standar. Nilai modulus kehalusan sebesar 3,37 menunjukkan bahwa gradasi agregat halus tergolong baik untuk campuran paving block. Dengan demikian, seluruh karakteristik agregat halus memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan dasar campuran paving block.

**Tabel 1.** Rekap Hasil Pengujian Agregat Halus

Karakteristik Agregat	Interval	Hasil Pengamatan		Rata-Rata	Keterangan
		I	II		
Kadar Lumpur	Maks 5%	3.4%	3.8%	3.59%	Memenuhi
Kadar Organik	<No.3	1	1	1	Memenuhi
Kadar Air	2%-5%	3.50%	4.17%	3.83%	Memenuhi
Berat Volume					
a. Kondisi Lepas	1.4-1.9 Kg/Liter	1.57	1.40	1.49	Memenuhi
b. Kondisi Padat	1.4-1.9 Kg/Liter	1.65	1.66	1.65	Memenuhi
Absorpsi	0.2%-2%	1.96%	1.63%	1.79%	Memenuhi
Berat Jenis Spesifik					
a. BJ. Nyata	1.6 – 3.3	2.68	2.38	2.53	Memenuhi
b. BJ. Dasar Kering	1.6 – 3.3	2.55	2.29	2.42	Memenuhi
c. BJ. Kering Permukaan	1.6 – 3.3	2.60	2.33	2.46	Memenuhi
Modulus Kehalusan	1.50 – 3.80	3.35	3.39	3.37	Memenuhi

Sumber: Data Diolah (2025)

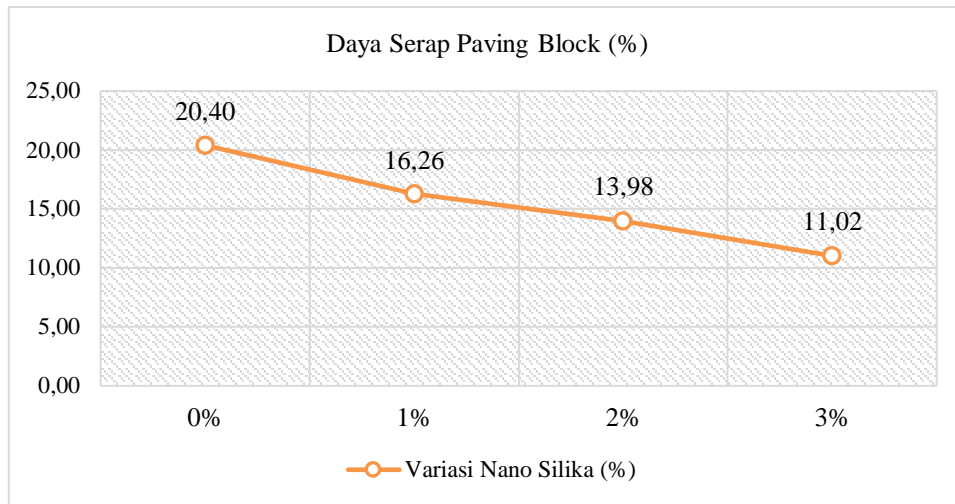
Pengujian karakteristik material dasar paving block mencakup analisis agregat halus, semen, air, dan nano silika untuk memastikan kesesuaian terhadap standar yang berlaku, seperti SNI 03-6821-2002. Uji agregat halus meliputi parameter kadar lumpur, di mana nilai rata-ratanya sebesar 3,59% masih memenuhi batas maksimum 5% yang ditetapkan [23]. Kadar organik juga berada dalam standar yang menyatakan bahwa penggunaan material ini aman [24]. Dengan berat jenis agregat halus rata-rata 2,53 dalam kondisi kering permukaan (SSD), bahan ini memenuhi standar [25]. Modulus kehalusan yang diperoleh sebesar 3,37 menunjukkan gradasi yang baik untuk campuran paving block, menandakan seluruh karakteristik agregat halus memang sesuai untuk digunakan [26].

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Daya Serap Paving Block

Variasi	Beban Awal (Gr)	Beban Kering (Gr)	Daya Serap Air (%)
0%	3433.78	2850.28	20.40
1%	3385.63	2912.11	16.26
2%	4505.19	3952.89	13.98
3%	3578.17	3222.12	11.02

Sumber: Data Diolah

**Tabel 2** menyajikan hasil uji rata-rata penyerapan air pada paving block berukuran  $20 \times 10 \times 8$  cm dengan umur 28 hari. Data menunjukkan adanya tren penurunan daya serap air seiring dengan peningkatan persentase nano silika dalam campuran. Pada paving block normal tanpa penambahan nano silika, daya serap air mencapai 20,40%. Ketika ditambahkan 1% nano silika, nilai tersebut menurun menjadi 16,26%, lalu turun lagi menjadi 13,98% pada variasi 2%, dan mencapai nilai terendah sebesar 11,02% pada variasi 3%. Hasil ini membuktikan bahwa nano silika efektif dalam menurunkan porositas paving block, karena partikel berukuran nano mampu mengisi rongga mikro dalam matriks beton sehingga mengurangi kemampuan material menyerap air. Dengan demikian, semakin tinggi kadar nano silika, semakin baik pula ketahanan paving block terhadap penetrasi air, yang pada akhirnya meningkatkan durabilitas dan umur pakai material.



**Gambar 1.** Grafik Hasil Pengujian Daya Serap Paving Block

Hasil uji penyerapan air pada paving block berukuran  $20 \times 10 \times 8$  cm setelah 28 hari menunjukkan bahwa penambahan nano silika dapat mengurangi daya serap air material. Paving block tanpa nano silika memiliki daya serap air tercatat sebesar 20,40%, yang menurun menjadi 16,26% dengan penambahan 1% nano silika, lalu mencapai 13,98% pada 2%, dan nilai terendah 11,02% pada 3% [27], [28] Penurunan ini menunjukkan bahwa nano silika efektif dalam mengurangi porositas paving block dengan mengisi rongga mikro dalam matriks beton. Selain itu, beberapa studi menunjukkan bahwa penambahan nano silika dapat meningkatkan sifat mekanik dan daya tahan beton, yang berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan paving block terhadap penetrasi air serta meningkatkan durabilitas dan umur pakai material [29].

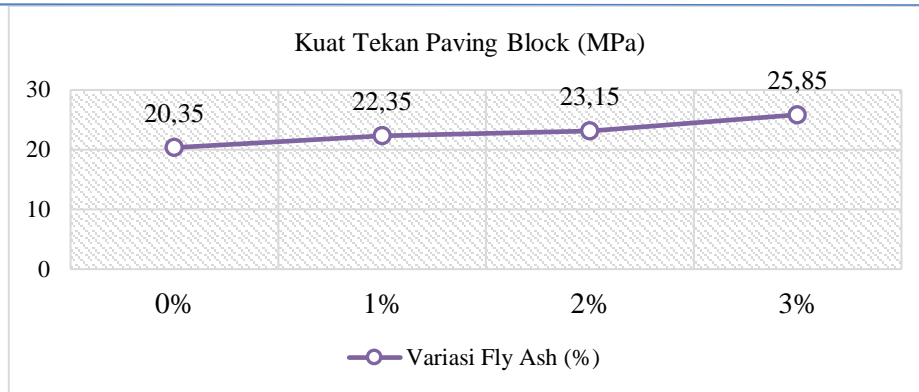
**Tabel 3.** Hasil Pengujian Kuat Tekan Paving Block

Variasi	Berat (Kg)	Beban (KN)	Kuat Tekan (MPa)
0%	2.85	407.00	20.35
1%	2.91	447.00	22.35
2%	3.95	463.00	23.15
3%	3.22	517.00	25.85

Sumber: Data Diolah

**Tabel 3** menyajikan hasil uji kuat tekan paving block dengan variasi penambahan nano silika 0%, 1%, 2%, dan 3% pada umur 28 hari. Hasil pada paving block normal menunjukkan kuat tekan rata-rata sebesar 20,35 MPa. Pada variasi 1% nano silika, kuat tekan meningkat menjadi 22,35 MPa. variasi 2% memperlihatkan nilai lebih tinggi yakni 23,15 MPa, dan variasi 3% menunjukkan peningkatan paling signifikan dengan kuat tekan rata-rata 25,85 MPa. Secara keseluruhan, keempat tabel ini memperlihatkan pola peningkatan kuat tekan seiring dengan bertambahnya kadar nano silika dalam campuran. Hal tersebut menegaskan bahwa nano silika berperan sebagai bahan tambahan yang mampu memperbaiki struktur mikro beton melalui reaksi pozzolanik dan pengisian pori, sehingga menghasilkan paving block yang lebih padat dan kuat.

Hasil uji kuat tekan pada paving block dengan variasi penambahan nano silika menunjukkan tren peningkatan seiring dengan bertambahnya persentase nano silika dalam campuran. Paving block normal tanpa nano silika memiliki kuat tekan rata-rata sebesar 20,35 MPa. Ketika ditambahkan 1% nano silika, kuat tekan meningkat menjadi 22,35 MPa. Paving block dengan 2% nano silika menunjukkan kuat tekan rata-rata 23,15 MPa, dan pada variasi 3% mencapai 25,85 MPa, mencerminkan peningkatan signifikan [15]. Peningkatan ini membuktikan bahwa nano silika berfungsi optimal sebagai bahan tambahan dengan memperbaiki struktur mikro beton melalui mekanisme reaksi pozzolanik serta pengisian rongga-pori, yang pada akhirnya menghasilkan paving block yang lebih padat dan kuat [30]. Hasil ini relevan dengan studi sebelumnya yang menunjukkan kontribusi positif nano silika terhadap kekuatan mekanis material beton.



**Gambar 2.** Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan Paving Block

Apabila dibandingkan antara hasil uji penyerapan air dan kuat tekan, terlihat adanya hubungan negatif: semakin tinggi penambahan nano silika, semakin tinggi kuat tekan yang diperoleh dan semakin rendah daya serap air. Dengan kata lain, penambahan nano silika memberikan dua keuntungan sekaligus, yakni meningkatkan performa mekanis paving block dan memperbaiki durabilitasnya. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan nano silika merupakan strategi yang tepat dalam menghasilkan material konstruksi ramah lingkungan, sebagaimana ditegaskan IPCC (2014) bahwa inovasi material merupakan salah satu solusi mitigasi emisi karbon dari industri semen. Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan sementara bahwa penambahan nano silika dalam campuran paving block berpengaruh positif baik terhadap peningkatan kuat tekan maupun penurunan daya serap air. Persentase optimal yang diteliti hingga 3% menunjukkan hasil signifikan, dengan potensi peningkatan kualitas paving block yang lebih besar apabila dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi di atas 3%. Temuan ini menegaskan relevansi penelitian dengan agenda pembangunan ramah lingkungan sekaligus memperkuat literatur tentang inovasi material konstruksi berbasis nano teknologi

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan nano silika pada paving block mampu meningkatkan kualitas material secara signifikan, ditandai dengan kenaikan kuat tekan dari 20,35 MPa menjadi 25,85 MPa serta penurunan daya serap air dari 20,40% menjadi 11,02% pada variasi 3%. Temuan ini membuktikan efektivitas nano silika sebagai bahan tambah yang memperbaiki struktur mikro beton melalui pengurangan porositas dan penguatan ikatan antar partikel semen. Kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan bukti empiris bahwa penggunaan nano silika tidak hanya meningkatkan performa mekanis tetapi juga memperpanjang durabilitas paving block, sehingga mendukung praktik konstruksi berkelanjutan dengan dampak lingkungan yang lebih rendah. Implikasi praktisnya, hasil penelitian dapat dijadikan acuan bagi industri konstruksi dalam merancang produk perkerasan yang lebih kuat dan tahan lama. Dari sisi pengembangan ilmu, penelitian ini memperluas kajian tentang material berbasis nano dalam beton dengan mengintegrasikan analisis kuat tekan dan daya serap air secara simultan. Untuk penelitian lanjutan, disarankan eksplorasi penambahan nano silika di atas 3% serta pengujian parameter lain seperti ketahanan abrasi, siklus beku-cair, dan permeabilitas, guna memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai potensi penerapannya dalam berbagai kondisi lapangan.

#### 5. Singkatan

$CO_2$	Karbon Dioksida
%	Persentase
C-S-H	Calcium, Silicate, Hydrate
PCC	Portland Composite Cement
SNI	Standar Nasional Indonesia
SSD	Saturate Surface-Dry
MPa	Kuat Tekan

#### 6. Referensi

- [1] C. S. G. Penteado, E. V. d. Carvalho, and R. C. C. Lintz, "Reusing Ceramic Tile Polishing Waste in Paving Block Manufacturing," *J Clean Prod.*, vol. 112, pp. 514–520, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.142.

- [2] C. S. G. Penteado, B. L. E. de Lara, G. C. dos S. Ferreira, P. H. A. Borges, and R. C. C. Lintz, "Use of Electric Arc Furnace Slag for Producing Concrete Paving Blocks," *Ambiente Construído*, vol. 19, no. 2, pp. 21–32, 2019, doi: 10.1590/s1678-86212019000200305.
- [3] R. Riyanto, Asrel, and Y. Jatnika, "Treatment of Bottom Ash Medical Waste (BAMW) From Hospital Infectious Waste Into Paving Block Products," *Eksakta Journal of Sciences and Data Analysis*, pp. 175–185, 2024, doi: 10.20885/eksakta.vol5.iss2.art8.
- [4] R. Mudiyo and S. Sudarno, "The Influence of Coconut Fiber on the Compressive and Flexural Strength of Paving Blocks," *Engineering Technology & Applied Science Research*, vol. 9, no. 5, pp. 4702–4705, 2019, doi: 10.48084/etasr.3008.
- [5] T. M. Fahri and J. Tarigan, "Penggunaan Crum Rubber Pada Pembuatan Paving Blok," *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 2, no. 3, pp. 523–533, 2021, doi: 10.46799/jsa.v2i3.192.
- [6] D. Ulfiana, Suripin, D. A. Wulandari, N. N. Hudaifah, and N. Salsabila, "The Development of Permeable Pavement From Demolished Construction Waste," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 969, no. 1, p. 012082, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/969/1/012082.
- [7] R. M. Andrew, "Global Co2 Emissions From Cement Production, 1928–2018," *Earth Syst Sci Data*, vol. 11, no. 4, pp. 1675–1710, 2019, doi: 10.5194/essd-11-1675-2019.
- [8] L. E. Noviani, E. Haryono, W. Supartono, I. Sahali, and F. E. Juliani, "Environmental Impact Analysis of PCC Cement Products (Portland Composite Cement) Using LCA (Life Cycle Assessment)," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1190, no. 1, p. 012003, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1190/1/012003.
- [9] Z. A. Khan, B. A. Salami, S. A. Hussain, M. A. Hasan, B. Al-Ramadan, and S. M. Rahman, "Dynamics of Greenhouse Gas Emissions From Cement Industries in Saudi Arabia—Challenges and Opportunities," *Ieee Access*, vol. 11, pp. 125631–125647, 2023, doi: 10.1109/access.2023.3328207.
- [10] S. Patil, D. A. Joshi, R. Menon, and L. K. Wadhwa, "Environmental Impact Assessment of Fly Ash and GGBS Based Geopolymer Concrete in Road Construction," *E3s Web of Conferences*, vol. 405, p. 03021, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202340503021.
- [11] Q. Zhang, B. Zhang, and D. Wang, "Environmental Benefit Assessment of Blended Cement With Modified Granulated Copper Slag," *Materials*, vol. 15, no. 15, p. 5359, 2022, doi: 10.3390/ma15155359.
- [12] S. K. Chaudhary and A. K. Sinha, "Effect of Silica Fume on Permeability and Microstructure of High Strength Concrete," *Civil Engineering Journal*, vol. 6, no. 9, pp. 1697–1703, 2020, doi: 10.28991/cej-2020-03091575.
- [13] A. A. Abed, I. Kamal, and A. Mojtahedi, "Enhancing Concrete Properties Using Silica Fume: Optimized Mix Design," *Journal of smart buildings and construction technology*, vol. 5, no. 1, pp. 84–91, 2023, doi: 10.30564/jsbct.v5i1.5678.
- [14] A. Rosyid, R. Boedisantoso, and A. P. Iswara, "Environmental Impact Studied Using Life Cycle Assessment on Cement Industry," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 506, no. 1, p. 012024, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/506/1/012024.
- [15] A. Laksono, D. Chandra, and R. Baniva, "Analisis Pengaruh Penggunaan Nano Silika Sebagai Substitusi Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Fc' 25 MPa," *Borneo Engineering Jurnal Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 14–25, 2024, doi: 10.35334/be.v8i1.4972.
- [16] V. E. Purba, N. M. Sianturi, D. S. Saragih, and D. Damanik, "Kombinasi Abu Dasar Batu Bara Dan Abu Vulkanik Sebagai Material Beton," *Jurnal Permukiman*, vol. 16, no. 1, p. 10, 2021, doi: 10.31815/jp.2021.16.10-20.
- [17] R. M. Iqbal and G. A. Hayu, "Pemanfaatan Abu Sekam Padi 10% dan Limbah Kaca Sebagai Bahan Substitusi pada Campuran Beton Mutu Fc' 25 MPa," *Sondir*, vol. 4, no. 2, pp. 6–15, 2020, doi: 10.36040/sondir.v4i2.3139.
- [18] M. Woods, A. Kulkarni, and J. M. Pearce, "The Potential of Replacing Concrete With Sand and Recycled Polycarbonate Composites: Compressive Strength Testing," 2023. doi: 10.20944/preprints202306.0271.v1.
- [19] S. Polat, "A Research on the Usage of Corn Cob in Producing Lightweight Concrete," *Natural Resources*, vol. 12, no. 10, pp. 339–347, 2021, doi: 10.4236/nr.2021.1210023.
- [20] M. Alhawat, A. Ashour, and A. El-Khoja, "Properties of Concrete Incorporating Different Nano Silica Particles," *Materials Research Innovations*, vol. 24, no. 3, pp. 133–144, 2019, doi: 10.1080/14328917.2019.1616140.

- [21] H. H. Alqamish and A. K. Al-Tamimi, "Development and Evaluation of Nano-Silica Sustainable Concrete," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 7, p. 3041, 2021, doi: 10.3390/app11073041.
- [22] M. S. Hassan, S. A. Salih, and M. S. Nasr, "Pozzolanic Activity and Compressive Strength of Concrete Incorporated Nano/Micro Silica," *Engineering and Technology Journal*, vol. 34, no. 3, pp. 483–496, 2016, doi: 10.30684/etj.34.3a.5.
- [23] C. A. Putri, "Pengaruh Material Butir Halus Terhadap Tingkat Kepadatan Campuran Material Residual," *Jurnal Infrastruktur*, vol. 4, no. 2, pp. 113–118, 2019, doi: 10.35814/infrastruktur.v4i2.700.
- [24] E. Suhelmidawati, "Pemanfaatan Pasir/Kerikil Sisa Penambangan Batu Kapur Pada Campuran Paving Block," *Jurnal Ilmiah Poli Rekayasa*, vol. 17, no. 1, p. 17, 2022, doi: 10.30630/jipr.17.1.211.
- [25] Grace, R. Rachman, and Alpius, "Penggunaan Limbah Beton Sebagai Agregat Pada Campuran Stone Matrix Asphalt Halus," *Paulus Civil Engineering Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 499–506, 2021, doi: 10.52722/pcej.v3i4.329.
- [26] N. Wendani, M. Selintung, and Alpius, "Studi Penggunaan Agregat Sungai Bittuang Sebagai Bahan Campuran AC-WC," *Paulus Civil Engineering Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 138–144, 2020, doi: 10.52722/pcej.v2i2.126.
- [27] T. M. Mendes and W. L. Repette, "Effect of Nano-Silica on Portland Cement Matrix," *Revista Ibracon De Estruturas E Materiais*, vol. 12, no. 6, pp. 1383–1389, 2019, doi: 10.1590/s1983-41952019000600009.
- [28] T. M. Mendes and W. L. Repette, "Effect of Nano-Silica on Portland Cement Matrices Containing Supplementary Cementitious Materials," *Revista Ibracon De Estruturas E Materiais*, vol. 14, no. 4, 2021, doi: 10.1590/s1983-41952021000400001.
- [29] M. Zarehparvar-Shoja and H. Eskandari-Naddaf, "Optimizing Compressive Strength of Micro- And Nano-Silica Concrete by Statistical Method," *Civil Engineering Journal*, vol. 3, no. 11, p. 1084, 2017, doi: 10.28991/cej-030939.
- [30] S. Suraja and N. Siregar, "Pemanfaatan Material Lokal Sedimen Bendungan Batang Ilunng Dalam Pembuatan Paving Block," *Borneo Engineering Jurnal Teknik Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 184–193, 2023, doi: 10.35334/be.v7i2.4546.