Vol. 12 No. 02 Oktober (2026) Halaman Artikel (124-132)

JURNAL TEKNIK SIPIL : RANCANG BANGUN

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

PENGARUH KOMBINASI ARANG DAN NATRIUM SILIKAT TERHADAP KUAT TEKAN DAN POROSITAS BETON PCC

THE EFFECT OF CHARCOAL AND SODIUM SILICATE COMBINATION ON THE COMPRESSIVE STRENGTH AND POROSITY OF PCC CONCRETE

Y Djoko Setiyarto[1*], dan Muhammad Aksan Ipaenin[2]

[1,2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Komputer Indonesia

Abstrak

Pengembangan beton dengan bahan tambah alternatif menjadi salah satu pendekatan untuk meningkatkan efisiensi material. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh penambahan arang (charcoal) dan natrium silikat terhadap kuat tekan dan porositas beton Portland Composite Cement (PCC). Kajian ini merupakan perluasan dari rangkaian eksperimen sebelumnya dan mengintegrasikan dua jalur variasi yang dianalisis secara terpisah, bukan sebagai rancangan faktorial penuh, yaitu kadar natrium silikat 5%, 10%, dan 15% pada arang tetap 2%, serta jalur tambahan kadar arang 2%, 3%, dan 5% pada natrium silikat tetap 5%. Kuat tekan diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari, sedangkan porositas dievaluasi pada umur 28 hari. Di antara seluruh campuran yang diuji, beton natrium silikat 5% tanpa arang (BNS-5) menghasilkan kuat tekan rata-rata 28 hari tertinggi sebesar 16,63 MPa dan porositas terendah 1,49%. Pada arang tetap 2%, peningkatan natrium silikat dari 5% menjadi 10% dan 15% menurunkan kuat tekan 28 hari dari 15,99 MPa menjadi 15,36 MPa dan 11,82 MPa, serta meningkatkan porositas dari 1,57% menjadi 1,65% dan 1,73%. Pada jalur variasi arang, campuran arang 5% dengan natrium silikat 5% menghasilkan kuat tekan rata-rata 16,35 MPa dan porositas 1,69%. Mekanisme mikrostruktur yang dibahas dalam penelitian ini merupakan interpretasi berbasis literatur karena tidak dilakukan karakterisasi mikrostruktur atau hidrasi secara langsung. Campuran yang mengandung arang menunjukkan potensi sebagai alternatif material, namun manfaat lingkungannya belum dapat dikuantifikasi karena penelitian ini tidak mencakup analisis daur hidup atau indikator lingkungan lainnya.

Kata kunci: arang; natrium silikat; beton PCC; kuat tekan; porositas.

Abstract

The development of concrete incorporating alternative additives is one approach to improving material efficiency. This study evaluates the effects of charcoal and sodium silicate addition on the compressive strength and porosity of Portland Composite Cement (PCC) concrete. This study extends the previous experimental series and integrates two variation paths that are analyzed separately rather than as a full factorial design: sodium silicate contents of 5%, 10%, and 15% at a constant charcoal content of 2%, and an additional charcoal-content path of 2%, 3%, and 5% at a constant sodium silicate content of 5%. Compressive strength was tested at 7, 14, and 28 days, while porosity was evaluated at 28 days. Among all mixtures tested, concrete with 5% sodium silicate without charcoal (BNS-5) produced the highest mean 28-day compressive strength of 16.63 MPa and the lowest porosity of 1.49%. At a constant 2% charcoal content, increasing sodium silicate from 5% to 10% and 15% reduced the 28-day strength from 15.99 MPa to 15.36 MPa and 11.82 MPa, while porosity increased from 1.57% to 1.65% and 1.73%. In the charcoal variation path, the mixture containing 5% charcoal and 5% sodium silicate achieved a mean 28-day compressive strength of 16.35 MPa with a porosity of 1.69%. The microstructural mechanisms discussed in this study are literature-based interpretations because no direct microstructural or hydration characterization was performed. Charcoal-containing mixtures show potential as alternative materials; however, their environmental benefits cannot be quantified because life-cycle assessment or other environmental indicators were not evaluated.

Keywords: *Charcoal; Sodium Silicate; PCC Concrete; Compressive Strength; Porosity*

PENDAHULUAN

Kebutuhan terhadap material konstruksi yang lebih ramah lingkungan semakin meningkat seiring besarnya kontribusi industri semen terhadap konsumsi energi dan emisi karbon. Beton berbasis semen Portland masih menjadi material utama dalam pekerjaan konstruksi karena memiliki keunggulan dari sisi ketersediaan bahan, kemudahan pengerjaan, dan kinerja mekanik yang baik. Namun, penggunaan semen dalam jumlah besar juga menimbulkan beban lingkungan yang tidak dapat diabaikan. Oleh karena itu, pengembangan beton yang lebih efisien, berkelanjutan, dan tetap memenuhi persyaratan teknis menjadi salah satu isu penting dalam teknologi material konstruksi saat ini.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja beton melalui penggunaan bahan tambah, bahan substitusi, maupun aktivator kimia. Penambahan zat epoxy dapat memengaruhi kuat tekan beton normal melalui perubahan karakteristik ikatan internal dan kepadatan matriks beton Setiyarto & Pradana (2022). Pendekatan lain

(*)Corresponding author
Telp: 081221001888
E-mail: y.djoko.setiyarto@email.unikom.ac.id
http://doi.org/0.33506/rb.v12i02.5604
Received xx Bulan Tahun; Accepted xx Bulan Tahun; Available online xx Bulan Tahun
E-ISSN: 2614-4344 P-ISSN: 2476-8928

dilakukan oleh Marino & Setiyarto (2020) melalui penggunaan tanah liat dalam beton geopolimer sebagai upaya mengurangi jumlah semen. Sejalan dengan itu, Setiyarto & Pahlevi (2017) juga menunjukkan bahwa abu dan kapur memiliki potensi sebagai material alternatif untuk menekan penggunaan semen dalam campuran beton. Ketiga penelitian tersebut memperlihatkan bahwa modifikasi material penyusun beton, baik melalui bahan kimia maupun material alternatif, dapat menjadi strategi penting dalam pengembangan beton yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan.

Dalam perkembangan material beton berkelanjutan, arang menjadi salah satu bahan tambah yang menarik untuk dikaji. Arang (*charcoal*) pada umumnya dihasilkan melalui proses pembakaran biomassa secara sederhana dengan suplai oksigen terbatas, seperti pembakaran kayu, tempurung kelapa, sekam padi, atau limbah organik lainnya menggunakan tungku tradisional maupun pembakaran terbuka. Proses ini biasanya tidak dilakukan dengan pengendalian suhu, waktu tinggal, maupun atmosfer pembakaran yang ketat, sehingga kualitas arang yang dihasilkan sangat bergantung pada jenis bahan baku dan metode pembakarannya. Setelah proses pembakaran selesai, arang umumnya didinginkan secara alami, kemudian dihancurkan dan dihaluskan sesuai kebutuhan penggunaan. Dalam penelitian beton, arang biasanya digiling menjadi serbuk halus agar lebih mudah tercampur dengan semen dan agregat.

Berbeda dengan arang biasa (charcoal), *biochar* diproduksi melalui proses pirolisis yang lebih terkontrol, yaitu pemanasan biomassa pada suhu tertentu (umumnya 300–700°C) dalam kondisi oksigen sangat terbatas atau hampir tanpa oksigen. Pada proses ini, suhu, laju pemanasan, waktu tinggal, dan kondisi reaktor dikendalikan secara sistematis sehingga menghasilkan material karbon yang lebih stabil, memiliki luas permukaan lebih tinggi, porositas yang lebih terukur, serta sifat fisik-kimia yang lebih konsisten. Karena karakteristik tersebut, biochar umumnya digunakan tidak hanya sebagai bahan bakar, tetapi juga untuk aplikasi lingkungan, pertanian, adsorben, dan material konstruksi berkelanjutan.

Arang yang digunakan dalam penelitian ini tidak diposisikan sebagai *biochar* terstandar, karena proses produksinya tidak dikendalikan secara khusus sebagaimana *biochar*. Namun, arang tetap memiliki beberapa karakter umum yang sejalan dengan *biochar*, terutama sebagai material berbasis karbon dan berstruktur relatif berpori. Oleh karena itu, beberapa kajian *biochar* masih dapat digunakan sebagai landasan teoritis pembanding, khususnya dalam menjelaskan kemungkinan pengaruh material karbon berpori terhadap kuat tekan, porositas, dan perilaku hidrasi beton.

Gupta et al. (2020) menunjukkan bahwa *biochar* dapat memengaruhi sifat mekanik dan permeabilitas beton, terutama pada beton yang mengalami paparan temperatur tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa *biochar* tidak hanya relevan dari sisi keberlanjutan, tetapi juga dari sisi performa material. Meskipun demikian, pengaruh *biochar* terhadap beton tidak selalu bersifat seragam. Karakteristik *biochar*, kadar penggunaan, dan kondisi perawatan sangat menentukan hasil akhir yang diperoleh. Hylton et al. (2024) menjelaskan bahwa kuat tekan mortar *biochar*-semen dipengaruhi oleh karakteristik *biochar*, seperti tingkat kejenuhan awal, rasio oksigen terhadap karbon, dan kandungan silika terlarut. Hal ini mendukung kemungkinan bahwa *biochar* dapat bekerja melalui mekanisme internal curing, yaitu menyerap air pada tahap awal dan melepaskannya kembali untuk mendukung proses hidrasi semen. Zhao et al. (2024) melalui meta-analisis juga menegaskan bahwa pengaruh biochar terhadap kuat tekan komposit semen Portland sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku, kondisi pirolisis, perlakuan awal, dosis, dan metode curing. Dengan demikian, *biochar* tidak dapat dianggap sebagai bahan tambah yang selalu meningkatkan mutu beton, melainkan perlu dikaji berdasarkan karakteristik dan kadar optimumnya.

Kajian lain juga memperkuat bahwa keberhasilan penggunaan biochar dalam material semen sangat bergantung pada kompatibilitasnya dengan sistem campuran. Rashid et al. (2024) menyatakan bahwa kinerja komposit semen termodifikasi biochar dipengaruhi oleh sifat fisik dan kimia *biochar* serta interaksinya dengan proses hidrasi semen. Patel et al. (2025) menunjukkan bahwa *biochar* pada kadar tertentu dapat meningkatkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan beban lentur, sekaligus menurunkan penyerapan air. *Biochar* memiliki prospek dalam pengembangan komposit semen dan beton geopolimer berkelanjutan, tetapi keberhasilannya sangat ditentukan oleh kualitas *biochar*, proporsi campuran, dan kompatibilitas material. Pemanfaatan *biochar* dalam material semen memerlukan pengendalian dosis agar manfaat keberlanjutan tidak diikuti oleh penurunan performa teknis beton (Tayyab et al., 2025).

Pemilihan arang sebagai bahan tambah dalam penelitian ini didasarkan pada karakter arang sebagai material berbasis karbon yang memiliki struktur berpori dan berpotensi memengaruhi kepadatan matriks beton. Berbeda dengan biochar yang umumnya dihasilkan melalui proses pirolisis

terkontrol, arang dalam penelitian ini diposisikan sebagai bahan tambah alternatif yang lebih sederhana dan mudah diperoleh. Penggunaan arang pada beton telah dikaji dalam beberapa penelitian sebelumnya. Alam et al. (2026) meneliti beton PCC dengan penambahan arang 2% dan natrium silikat. Sebagian data dasar dan seri variasi natrium silikat pada kadar arang tetap 2% telah dilaporkan dalam Alam et al. (2026). Penelitian dalam naskah ini diposisikan sebagai perluasan studi tersebut dengan menambahkan rangkaian eksperimen variasi kadar arang, terutama kadar 3% dan 5%, pada natrium silikat tetap 5%, kemudian membahas kedua jalur variasi secara terintegrasi. Dengan demikian, data yang telah dilaporkan sebelumnya digunakan secara transparan sebagai seri pembanding, sedangkan kebaruan penelitian ini terletak pada penambahan jalur variasi arang dan evaluasi gabungan kuat tekan serta porositas tanpa menafsirkan rancangan sebagai faktorial penuh. Arang juga merupakan material berbasis karbon dan umumnya memiliki struktur berpori, sehingga secara konsep dapat memengaruhi penyerapan air, hidrasi, porositas, dan kuat tekan beton (Wu et al., 2023). Material karbon berpori dapat dimanfaatkan dalam beton, tetapi efektivitasnya sangat bergantung pada jenis material, kadar penggunaan, dan kompatibilitasnya dengan matriks semen (Chin et al., 2020). Selain itu, penggunaan abu arang kayu pada kadar 3% dapat memberikan kuat tekan optimum pada umur 28 hari (William et al., 2023). Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa rentang kadar arang rendah hingga sedang, khususnya sekitar 2–5%, masih relevan untuk dikaji karena berpotensi memengaruhi kuat tekan dan porositas tanpa mengubah karakter campuran secara berlebihan.

Gel C–S–H merupakan produk hidrasi utama yang berperan dalam meningkatkan kepadatan matriks semen dan kekuatan beton. Wang et al. (2019) menunjukkan bahwa natrium silikat pada sistem semen Portland/kalsium aluminat/gipsum mampu meningkatkan kuat tekan awal serta memperbaiki struktur pori melalui pembentukan gel C–S–H. Zarzuela et al. (2020) juga menjelaskan bahwa reaksi antara silika oligomer dan portlandit dapat menghasilkan gel C–S–H, sehingga menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk memperbaiki material berbasis semen.

Namun, seperti halnya *biochar*, penggunaan natrium silikat juga memiliki batas kadar efektif. Penambahan natrium silikat yang berlebihan tidak selalu menghasilkan peningkatan mutu beton, bahkan dapat mengganggu keseimbangan reaksi dan struktur pori. Ridha (2024) menunjukkan bahwa penggunaan natrium silikat pada produk bata dapat memengaruhi penyerapan air dan kuat tekan, tetapi peningkatan kadar tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan performa. Hal ini menegaskan bahwa natrium silikat perlu digunakan pada kadar yang tepat agar dapat memberikan efek pemadatan matriks tanpa menimbulkan dampak negatif terhadap beton.

Kombinasi arang dan natrium silikat menarik untuk diteliti karena keduanya memiliki fungsi yang berbeda dan berpotensi saling melengkapi. Arang merupakan material berbasis karbon berpori yang dapat memengaruhi susunan dan kepadatan matriks beton. Berdasarkan literatur, natrium silikat dapat menyediakan silika terlarut yang berpotensi berkontribusi pada pembentukan produk hidrasi tambahan dan perubahan struktur pori. Mekanisme tersebut digunakan sebagai dasar interpretasi dan tidak dianggap telah terbukti secara langsung dalam penelitian ini karena tidak dilakukan pengujian mikrostruktur atau hidrasi. Pada beton *Portland Composite Cement* (PCC), kombinasi kedua material tersebut perlu dievaluasi berdasarkan data kuat tekan dan porositas yang terukur.

Meskipun kombinasi arang dan natrium silikat pada beton PCC telah diteliti sebelumnya, ruang evaluasi terhadap perubahan kedua bahan melalui jalur variasi yang berbeda masih terbatas. Kuat tekan dan porositas merupakan dua parameter yang perlu dievaluasi secara bersamaan. Kuat tekan menunjukkan kemampuan beton dalam menahan beban tekan, sedangkan porositas menggambarkan proporsi rongga yang berkaitan dengan karakter transport fluida dan durabilitas. Oleh karena itu, penggunaan arang dan natrium silikat tidak cukup dinilai hanya dari nilai kuat tekan, tetapi juga perlu dievaluasi berdasarkan perubahan porositas beton.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh kombinasi arang dan natrium silikat terhadap kuat tekan dan porositas beton PCC. Rancangan penelitian tidak menggunakan desain faktorial penuh. Eksperimen terdiri atas dua jalur variasi yang dianalisis secara terpisah, yaitu: (1) natrium silikat 5%, 10%, dan 15% pada kadar arang tetap 2%; dan (2) arang 2%, 3%, dan 5% pada kadar natrium silikat tetap 5%. Dengan demikian, hasil tidak digunakan untuk menyimpulkan interaksi faktorial seluruh kombinasi kadar. Secara khusus, penelitian ini bertujuan mengevaluasi perkembangan kuat tekan, membandingkan porositas umur 28 hari, dan mengidentifikasi komposisi dengan nilai kinerja yang paling baik di antara kadar yang diuji.

Kebaruan penelitian ini terletak pada perluasan studi Alam et al. (2026) melalui penambahan jalur variasi kadar arang pada natrium silikat tetap 5%, khususnya kadar arang 3% dan 5%, serta pada

evaluasi terintegrasi kedua jalur variasi terhadap perkembangan kuat tekan dan porositas beton PCC. Seri natrium silikat pada arang tetap 2% diperlakukan sebagai data dasar yang telah dilaporkan sebelumnya, sedangkan seri tambahan digunakan untuk memperluas ruang evaluasi. Rancangan tersebut tetap dianalisis sebagai dua jalur terpisah dan tidak digunakan untuk menyimpulkan interaksi faktorial penuh antara kedua bahan tambah.

TINJAUAN PUSTAKA

Kuat Tekan Beton

Kuat tekan merupakan salah satu parameter utama dalam menentukan kinerja mekanik beton. Nilai kuat tekan menggambarkan kemampuan beton dalam menahan beban tekan hingga mengalami keruntuhan. Pengujian kuat tekan umumnya dilakukan menggunakan benda uji silinder atau kubus dengan pembebanan aksial hingga beton mengalami kegagalan struktur. Nilai kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

dengan,

f'c = kuat tekan beton (MPa)
P = beban maksimum saat benda uji runtuh (N)
A = luas penampang benda uji (mm²)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa kuat tekan beton bergantung pada besar beban maksimum yang mampu ditahan oleh beton serta luas penampang benda uji. Pada beton yang dimodifikasi dengan bahan tambah seperti arang dan natrium silikat, perubahan mikrostruktur beton dapat memengaruhi proses hidrasi semen dan pembentukan produk hidrasi seperti gel C-S-H yang berperan dalam meningkatkan kekuatan mekanik beton.

Porositas Beton

Porositas merupakan parameter penting dalam mengevaluasi struktur mikro beton. Porositas didefinisikan sebagai rasio antara volume rongga terhadap volume total material beton. Tingkat porositas yang tinggi dapat menurunkan kekuatan mekanik beton serta meningkatkan permeabilitas terhadap air dan zat agresif.

Dalam penelitian ini, porositas dihitung secara gravimetri berdasarkan selisih massa benda uji pada kondisi jenuh dan kering terhadap volume geometris benda uji dan berat isi air. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$n = \frac{Wb - Wk}{Vb \times \gamma_{air}} \times 100\% \quad (2)$$

dengan,

n = porositas beton (%),
Wb = berat jenuh beton (g),
Wk = berat kering beton (g),
Vb = volume benda uji (cm³),
γ_{air} = berat isi air (g/cm³).

Nilai porositas menunjukkan persentase volume rongga yang terdapat dalam beton. Struktur beton dengan porositas yang rendah umumnya memiliki kekuatan mekanik yang lebih tinggi karena matriks semen menjadi lebih padat dan homogen (Gupta et al., 2020).

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium untuk mengevaluasi pengaruh kadar arang dan natrium silikat terhadap kuat tekan dan porositas beton *Portland Composite Cement* (PCC). Beton dirancang dengan mutu rencana fc' 15 MPa dan menggunakan benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Arang dinyatakan sebagai persentase terhadap berat semen, sedangkan natrium silikat dinyatakan sebagai persentase terhadap berat air pencampur. Natrium silikat yang digunakan merupakan produk komersial ROFA dalam bentuk larutan (water glass). Berdasarkan label produk, larutan memiliki kandungan Na2O sekitar 12,5%, SiO2 sekitar 29,2%, dan modulus sekitar 2,2-2,5; kandungan air produk tidak dinyatakan secara eksplisit. Air pencampur utama sebesar 1,228 kg dan semen sebesar 1,865 kg per acuan menghasilkan FAS nominal 0,658. Larutan natrium silikat ditambahkan di luar air pencampur utama dan kontribusi air yang terkandung di dalam larutan tidak dikoreksi secara terpisah. Oleh karena itu, nilai 0,658 diperlakukan sebagai FAS nominal, sedangkan FAS efektif total berpotensi lebih tinggi dan meningkat seiring penambahan dosis larutan. Massa larutan natrium silikat untuk kadar 5%, 10%, dan 15% berturut-turut adalah 0,0614 kg, 0,1228 kg, dan 0,1842 kg per acuan.

Arang (charcoal) yang digunakan merupakan arang komersial yang umum dijual di pasaran untuk keperluan pembakaran makanan. Sebelum digunakan, arang dihancurkan dan dihaluskan secara manual. Tidak dilakukan pengujian distribusi ukuran partikel maupun analisis saringan. Arang digunakan dalam kondisi kering sebagaimana kondisi saat diperoleh dari pasaran. Dalam campuran beton, arang ditambahkan sebesar 2%, 3%, dan 5% terhadap berat semen. Penelitian ini tidak melakukan karakterisasi kimia, mineralogi, maupun mikrostruktur terhadap arang yang digunakan; keterbatasan ini dipertimbangkan dalam interpretasi hasil.

Pemilihan kadar arang dan natrium silikat dalam penelitian ini didasarkan pada kombinasi antara hasil penelitian terdahulu, studi pendahuluan, serta pertimbangan praktis terhadap workability dan target kuat tekan beton. Kadar arang 2%, 3%, dan 5% dipilih karena rentang tersebut masih tergolong

rendah hingga sedang sehingga masih memungkinkan digunakan dalam campuran beton tanpa mengubah karakter campuran secara ekstrem. Penggunaan arang pada kadar 2% dapat memberikan peningkatan sifat mekanik dan menurunkan penyerapan air pada material semen (Patel et al., 2025). Pengaruh arang terhadap kuat tekan sangat bergantung pada karakteristik arang, dosis, perlakuan awal, dan metode curing, sehingga variasi kadar diperlukan untuk menentukan dosis yang paling sesuai (Hylton et al., 2024; Zhao et al., 2024). Oleh karena itu, kadar 2% digunakan sebagai kadar awal yang relatif aman, sedangkan kadar 3% dan 5% digunakan untuk melihat apakah peningkatan arang masih dapat mempertahankan kuat tekan dan mengendalikan porositas beton PCC. Rincian kode dan kadar bahan tambah untuk seluruh variasi campuran penelitian disajikan pada Tabel 1. Proporsi dasar campuran acuan yang digunakan sebagai dasar penyusunan seluruh variasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Variasi Campuran Penelitian

Kode	Arang (% berat semen)	Natrium silikat (% berat air)	Keterangan
BN	0	0	Beton normal
BNS-5	0	5	Beton natrium silikat
BA2	2	0	Beton arang 2%
BA2-NS5	2	5	Variasi arang tetap 2%
BA2-NS10	2	10	Variasi arang tetap 2%
BA2-NS15	2	15	Variasi arang tetap 2%
BA3-NS5	3	5	Variasi natrium silikat tetap 5%
BA5-NS5	5	5	Variasi natrium silikat tetap 5%

Tabel 2. Proporsi Dasar Campuran Per Acuan

Material	Jumlah acuan (kg)
Semen PCC	1,865
Air pencampur	1,228
Agregat halus (pasir)	4,263
Agregat kasar (kerikil)	6,638
FAS nominal	0,658

Kadar natrium silikat 5%, 10%, dan 15% dipilih untuk mengevaluasi pengaruh peningkatan dosis natrium silikat terhadap kuat tekan dan porositas. Berdasarkan literatur, silika terlarut dari natrium silikat dapat berkontribusi terhadap perubahan produk hidrasi dan struktur pori, tetapi mekanisme tersebut tidak diverifikasi secara langsung dalam penelitian ini. Kadar 5% digunakan sebagai kadar awal/moderat, sedangkan kadar 10% dan 15% digunakan untuk mengevaluasi kecenderungan kinerja pada dosis yang lebih tinggi. Berdasarkan proporsi dasar tersebut, jumlah arang dan larutan natrium silikat untuk masing-masing variasi dirangkum pada Tabel 3. Bahan tambah arang dan natrium silikat serta kondisi campuran yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Variasi campuran dirancang untuk menguji dua kecenderungan utama secara terpisah. Jalur pertama mengevaluasi peningkatan natrium silikat pada arang tetap 2%, sedangkan jalur kedua mengevaluasi peningkatan kadar arang pada natrium silikat tetap 5%. Rancangan ini bukan desain faktorial penuh, sehingga hasil penelitian tidak ditafsirkan sebagai efek interaksi seluruh kombinasi kadar arang dan natrium silikat.

Tabel 3. Kadar Bahan Tambah pada Proporsi Acuan

Kode	Arang (kg)	Larutan Na_2SiO_3 (kg)	FAS Nominal
BN	0	0	0,658
BNS-5	0	0,0614	0,658
BA2	0,037	0	0,658
BA2-NS5	0,037	0,0614	0,658
BA2-NS10	0,037	0,1228	0,658
BA2-NS15	0,037	0,1842	0,658
BA3-NS5	0,056	0,0614	0,658
BA5-NS5	0,093	0,0614	0,658

Catatan: Na_2SiO_3 dihitung terhadap 1,228 kg air pencampur dan ditambahkan di luar air; FAS nominal tetap 0,658.



Gambar 1. Campuran Arang, Natrium Silikat dan Beton

Data eksperimen berasal dari dua rangkaian pengujian laboratorium yang dilakukan pada waktu berbeda, yaitu rangkaian variasi natrium silikat pada arang tetap 2% dan rangkaian lanjutan variasi kadar arang pada natrium silikat tetap 5%. Untuk setiap komposisi, benda uji dicetak dari adukan/batch campuran yang sama. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari menggunakan tiga benda uji pada setiap umur, sehingga digunakan sembilan benda uji kuat tekan untuk setiap variasi. Pengujian porositas umur 28 hari menggunakan tiga benda uji tambahan yang secara fisik terpisah dari benda uji

kuat tekan, tetapi berasal dari campuran yang sama. Dengan delapan variasi yang dianalisis, dataset terdiri atas 72 benda uji kuat tekan dan 24 benda uji porositas, atau total 96 benda uji. Seluruh benda uji dirawat dengan metode perendaman dalam air hingga umur pengujian.

Pengujian kuat tekan mengacu pada ASTM C39/C39M. Nilai kuat tekan dihitung berdasarkan Persamaan 1. Pengujian porositas dilakukan dengan metode gravimetri yang mengadaptasi prinsip penentuan rongga permeabel pada ASTM C642. Benda uji porositas umur 28 hari dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam, kemudian ditimbang untuk memperoleh massa kering (Wk). Selanjutnya, benda uji direndam dalam air selama 24 jam pada suhu ruang sekitar 27°C. Setelah perendaman, benda uji diangkat, permukaannya dilap hingga kondisi surface-dry/SSD, lalu ditimbang untuk memperoleh massa jenuh (Wb). Volume benda uji (Vb) ditentukan berdasarkan dimensi geometrisnya. Karena metode ini menggunakan volume geometris dan tidak melibatkan penimbangan benda uji dalam kondisi terendam, nilai yang diperoleh diperlakukan sebagai porositas berbasis penyerapan air yang dapat diakses pada kondisi perendaman yang digunakan, bukan sebagai total volume pori atau volume of permeable voids ASTM C642 yang dihitung secara penuh.

Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif. Untuk kuat tekan dan porositas, hasil disajikan sebagai nilai rata-rata, standar deviasi (SD), dan koefisien variasi (CV) dari tiga benda uji pada setiap kondisi pengujian. Ketiga benda uji pada satu kondisi berasal dari batch campuran yang sama; oleh karena itu, SD dan CV digunakan untuk menggambarkan variasi antar-benda uji dalam satu batch (within-batch specimen variability) dan tidak merepresentasikan variasi antar-batch independen. Perbandingan antar campuran digunakan untuk menggambarkan kecenderungan data dan tidak dinyatakan sebagai perbedaan yang signifikan secara statistik karena penelitian ini tidak melakukan uji inferensial seperti ANOVA atau uji-t.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan kuat tekan beton

Seluruh variasi campuran menunjukkan kenaikan kuat tekan dari umur 7 hari ke 28 hari. Hal ini menandakan bahwa proses hidrasi semen berlangsung pada semua campuran, tetapi laju perkembangannya bervariasi. Data perkembangan kuat tekan rata-rata disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perkembangan Kuat Tekan Rata-Rata Beton

Variasi campuran	7 hari, mean ± SD (CV)	14 hari, mean ± SD (CV)	28 hari, mean ± SD (CV)
Beton normal	7,85 ± 1,18 (15,08%)	12,17 ± 1,71 (14,07%)	16,00 ± 1,0 (6,25%)
Beton arang 2%	8,84 ± 0,44 (5,01%)	13,17 ± 0,35 (2,65%)	14,23 ± 2,13 (14,94%)
Beton natrium 5%	8,35 ± 0,98 (11,75%)	11,18 ± 1,59 (14,25%)	16,63 ± 0,42 (2,50%)
Beton arang 2% + natrium 5%	8,70 ± 1,85 (21,31%)	14,01 ± 2,50 (17,85%)	15,99 ± 1,08 (6,72%)
Beton arang 2% + natrium 10%	7,71 ± 1,30 (16,83%)	10,05 ± 0,65 (6,48%)	15,36 ± 1,83 (11,92%)
Beton arang 2% + natrium 15%	7,86 ± 0,64 (8,08%)	9,34 ± 0,77 (8,21%)	11,82 ± 1,73 (14,62%)
Beton arang 3% + natrium 5%	6,02 ± 0,44 (7,36%)	12,74 ± 1,47 (11,54%)	15,75 ± 0,65 (4,11%)
Beton arang 5% + natrium 5%	7,50 ± 1,50 (19,95%)	12,31 ± 1,60 (12,98%)	16,35 ± 2,61 (15,95%)

Beton normal mencapai kuat tekan rata-rata 16,00 MPa pada umur 28 hari. Campuran natrium silikat 5% tanpa arang (BNS-5) memberikan nilai rata-rata tertinggi sebesar 16,63 MPa (SD 0,42 MPa; CV 2,50%). Pada arang tetap 2%, kuat tekan 28 hari menurun dari 15,99 MPa pada natrium silikat 5% menjadi 15,36 MPa pada 10% dan 11,82 MPa pada 15%. Karena natrium silikat digunakan dalam bentuk larutan dan kandungan air produk tidak dikoreksi secara terpisah, peningkatan dosis juga berpotensi meningkatkan FAS efektif. Oleh karena itu, penurunan kuat tekan pada dosis yang lebih tinggi tidak diatribusikan secara eksklusif pada efek kimia silikat, tetapi dapat pula dipengaruhi oleh perubahan jumlah air efektif dalam sistem. Perkembangan kuat tekan seluruh variasi pada umur 7, 14, dan 28 hari divisualisasikan pada Gambar 2.

Pada variasi arang dengan natrium silikat tetap 5%, kuat tekan rata-rata 28 hari berubah dari 15,99 MPa pada arang 2% menjadi 15,75 MPa pada arang 3%, kemudian 16,35 MPa pada arang 5%. Pola yang tidak monoton ini menunjukkan bahwa porositas yang terukur bukan satu-satunya parameter yang berkaitan dengan kuat tekan. Penelitian ini tidak mengidentifikasi mekanisme mikrostruktur penyebab pola tersebut secara langsung.

Hasil Porositas Beton Umur 28 Hari

Karena pengujian porositas dilakukan pada umur 28 hari, evaluasi porositas difokuskan pada umur tersebut. Beton normal memiliki porositas 1,89%, sedangkan campuran natrium silikat 5% menunjukkan porositas 1,49%. Pada variasi natrium silikat dengan arang tetap 2%, peningkatan kadar silikat di atas 5% diikuti peningkatan nilai porositas hingga 1,73% pada kadar 15% dan penurunan nilai rata-rata kuat tekan. Temuan ini bersifat deskriptif terhadap data eksperimen dan tidak digunakan sebagai bukti langsung perubahan mikrostruktur.

Perbandingan kuat tekan dan porositas berbasis penyerapan air pada umur 28 hari disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Kuat Tekan dan Porositas Beton Umur 28 Hari

Kode	Kuat tekan 28 hari (MPa)	Porositas, mean ± SD (CV) (%)
BN	16,00	1,89 ± 0,18 (9,61%)
BNS-5	16,63	1,49 ± 0,05 (3,53%)
BA2	14,23	1,64 ± 0,04 (2,20%)
BA2-NS5	15,99	1,57 ± 0,12 (7,33%)
BA2-NS10	15,36	1,65 ± 0,03 (1,52%)
BA2-NS15	11,82	1,73 ± 0,01 (0,58%)
BA3-NS5	15,75	1,62 ± 0,03 (1,85%)
BA5-NS5	16,35	1,69 ± 0,09 (5,50%)

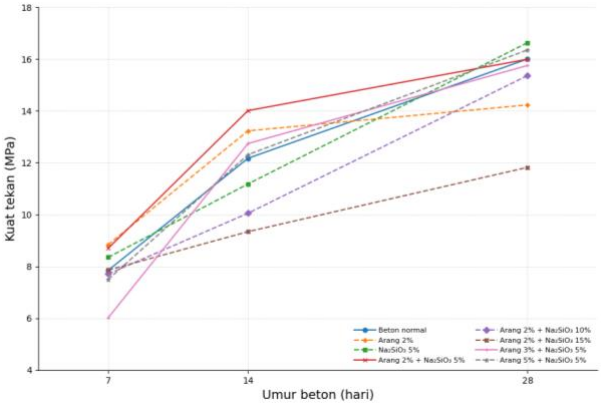
Catatan: nilai porositas dihitung secara gravimetri dari selisih massa jenuh-SSD dan massa kering terhadap volume geometris benda uji. Nilai tersebut diinterpretasikan sebagai porositas berbasis penyerapan air pada kondisi pengujian yang digunakan.

Pada jalur variasi arang dengan natrium silikat tetap 5%, porositas meningkat dari 1,57% pada arang 2% menjadi 1,69% pada arang 5%. Seluruh nilai tersebut masih lebih rendah daripada beton normal pada data penelitian ini. Hasil ini menunjukkan perbedaan porositas antar campuran, tetapi tidak digunakan untuk menyimpulkan mekanisme pemadatan matriks secara langsung tanpa pengujian mikrostruktur.

Hubungan Porositas dan Kuat Tekan

Hubungan antara porositas dan kuat tekan pada umur 28 hari menunjukkan kecenderungan negatif secara umum, tetapi tidak sepenuhnya linier. Campuran natrium silikat 5% tanpa arang (BNS-5) memiliki porositas 1,49% dan kuat tekan rata-rata 16,63 MPa, sedangkan campuran arang 2% + natrium silikat 15% memiliki porositas 1,73% dan kuat tekan rata-rata 11,82 MPa. Perbandingan ini digunakan untuk menggambarkan kecenderungan data, bukan untuk menetapkan hubungan sebab-akibat.

Campuran arang 5% + natrium silikat 5% mencapai kuat tekan rata-rata 16,35 MPa meskipun porositasnya lebih tinggi daripada campuran arang 2% dan 3%. Berdasarkan literatur mengenai material karbon berpori, pola tersebut mungkin berkaitan dengan mekanisme internal curing, yaitu kemampuan material berpori menyimpan dan melepaskan kembali sebagian air selama hidrasi. Namun, mekanisme ini belum dapat dikonfirmasi dalam penelitian karena tidak dilakukan pengujian mikrostruktur, distribusi pori, atau produk hidrasi. Demikian pula, kemungkinan pembentukan C-S-H tambahan akibat natrium silikat diperlakukan sebagai interpretasi berbasis literatur, bukan sebagai hasil observasi langsung.



Gambar 2. Perkembangan Kuat Tekan Beton

Pengaruh Arang dan Natrium Silikat

Tabel 6 merangkum hasil numerik tiap variasi dengan interpretasi deskriptif berbasis data. Campuran natrium silikat 5% tanpa arang (BNS-5) menghasilkan kuat tekan rata-rata 28 hari tertinggi sebesar 16,63 MPa dengan CV 2,50% dan porositas terendah 1,49%. Pada arang tetap 2%, peningkatan dosis larutan natrium silikat 5%, 10%, dan 15% diikuti penurunan kuat tekan 15,99; 15,36; dan 11,82 MPa serta peningkatan porositas 1,57%; 1,65%; dan 1,73%. Kecenderungan tersebut searah dengan kemungkinan meningkatnya FAS efektif akibat kontribusi air dari larutan natrium silikat, tetapi kontribusi relatif antara perubahan FAS efektif dan efek kimia silikat tidak dapat dipisahkan dalam rancangan penelitian ini. Perbandingan antar campuran tetap ditafsirkan secara deskriptif karena tidak dilakukan uji statistik inferensial.

Pada jalur variasi arang dengan natrium silikat tetap 5%, campuran arang 5% + natrium silikat 5% menghasilkan nilai rata-rata kuat tekan 16,35 MPa dengan porositas 1,69%. Hasil ini menunjukkan bahwa campuran yang mengandung arang masih dapat mempertahankan kuat tekan yang mendekati campuran natrium silikat 5% tanpa arang pada rentang pengujian ini. Interpretasi mekanismenya dibatasi pada kecenderungan data dan dukungan literatur.

Tabel 6. Evaluasi Berbasis Data

Kode	fc 28 hari (MPa)	Porositas (%)	Interpretasi berbasis data
BN	16,00	1,89	Campuran kontrol.
BNS-5	16,63	1,49	Mean fc' tertinggi; porositas terendah; CV 2,50%.
BA2	14,23	1,64	Mean fc' lebih rendah dari kontrol.
BA2-NS5	15,99	1,57	Mean fc' mendekati kontrol; porositas lebih rendah.

BA2-NS10	15,36	1,65	Mean fc' lebih rendah dari BA2-NS5.
BA2-NS15	11,82	1,73	Mean fc' terendah pada jalur Na_2SiO_3.
BA3-NS5	15,75	1,62	Mean fc' < kontrol; CV 4,11%.
BA5-NS5	16,35	1,69	Mean fc' mendekati BNS-5; porositas lebih tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan natrium silikat dan arang menunjukkan kecenderungan yang berbeda terhadap kuat tekan dan porositas beton *Portland Composite Cement* (PCC). Di antara seluruh campuran yang diuji, BNS-5 menghasilkan kuat tekan rata-rata 28 hari tertinggi sebesar 16,63 MPa dengan CV 2,50% dan porositas terendah 1,49%. Pada arang tetap 2%, peningkatan dosis larutan natrium silikat dari 5% menjadi 10% dan 15% diikuti penurunan kuat tekan dari 15,99 MPa menjadi 15,36 MPa dan 11,82 MPa serta peningkatan porositas dari 1,57% menjadi 1,65% dan 1,73%. Karena kontribusi air dalam larutan natrium silikat tidak dikoreksi secara terpisah, kecenderungan tersebut tidak dapat diatribusikan hanya pada dosis silikat dan mungkin juga dipengaruhi oleh peningkatan FAS efektif. Pada natrium silikat tetap 5%, campuran arang 5% menghasilkan kuat tekan 16,35 MPa dengan porositas 1,69%. Mekanisme internal curing maupun pembentukan C-S-H tambahan tidak dibuktikan secara langsung dan hanya digunakan sebagai interpretasi berbasis literatur. Pemanfaatan arang komersial menunjukkan potensi sebagai bahan tambah alternatif, tetapi manfaat keberlanjutan belum dapat dikuantifikasi karena penelitian tidak mencakup life cycle assessment, emisi karbon, embodied energy, atau indikator lingkungan lainnya.

Implikasi praktis penelitian ini adalah bahwa pada kondisi pengujian yang digunakan, dosis larutan natrium silikat 5% memberikan kuat tekan rata-rata lebih tinggi dan porositas berbasis penyerapan air lebih rendah dibandingkan dosis 10% dan 15% pada arang tetap 2%. Namun, karena FAS efektif tidak dikendalikan secara terpisah terhadap kandungan air larutan natrium silikat, hasil tersebut harus dipahami sebagai respons campuran terhadap dosis larutan komersial secara keseluruhan, bukan sebagai efek silikat murni. Di sisi lain, penggunaan arang hingga 5% masih menunjukkan potensi untuk mempertahankan kuat tekan beton PCC dalam rentang kadar yang diuji.

REFERENSI

Alam, F. F. N., Sihab, M., & Setiyarto, Y. D. (2026). Pengaruh Natrium Silikat Pada Beton PCC Dengan Penambahan Arang 2% Terhadap Kuat Tekan dan Porositas. CRANE : Civil Engineering Research Journal, 7(1), 42–52. https://doi.org/10.34010/crane.v7i1.19638

ASTM C39. (2020). Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-20

ASTM C642-21. (2022). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

Chin, C. O., Yang, X., Kong, S. Y., Paul, S. C., Susilawati, & Wong, L. S. (2020). Mechanical and thermal properties of lightweight concrete incorporated with activated carbon as coarse aggregate. Journal of Building Engineering, 31, 101347. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101347

Gupta, S., Kua, H. W., & Pang, S. D. (2020). Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature. Construction and Building Materials, 234, 117338. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117338

Hylton, J., Hugen, A., Rowland, S. M., Griffin, M., & Tunstall, L. E. (2024). Relevant biochar characteristics influencing compressive strength of biochar-cement mortars. Biochar, 6(1). https://doi.org/10.1007/s42773-024-00375-6

Kiran, G. U., Nakkeeran, G., Roy, D., & Alaneme, G. U. (2025). Impact of biochar on strength, durability, and carbon sequestration in cement based materials. Discover Sustainability, 6(1). https://doi.org/10.1007/s43621-025-01481-6

Marino, G., & Setiyarto, Y. D. (2020). Penggunaan Tanah Liat untuk Mengurangi Jumlah Semen pada Beton Geopolimer. CRANE: Civil Engineering Research Journal, 1(2), 82–88. https://doi.org/10.34010/crane.v1i2.4186

Patel, R., Stobbs, J., & Acharya, B. (2025). Study of biochar in cementitious materials for developing green concrete composites. Scientific Reports, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-07210-3

Rashid, S., Raghav, A., Goyal, A., Danie Roy, A. B., & Singh, M. (2024). Biochar as a sustainable additive in cementitious composites: A comprehensive analysis of properties and environmental impact. Industrial Crops and Products, 209, 118044.

https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2024.118044

Ridha, M. A. (2024). The Effect of Sodium Silicate (Na2SiO3) Addition against Water Absorption and Compressive Strength in Bricks. International Journal of Engineering, 6(1).

Setiyarto, Y. D., & Pahlevi, M. H. A. (2017, November 29). Potensi Penggunaan Abu dan Kapur untuk Mengurangi Jumlah Semen dalam Campuran Beton. Prosiding SAINTIKS FTIK UNIKOM.

Setiyarto, Y. D., & Pradana, D. (2022). Pengaruh Penggunaan Zat Epoxy Terhadap Kuat Tekan Beton Normal. CRANE : Civil Engineering Research Journal, 3(1), 12–21. https://doi.org/10.34010/crane.v3i1.7135

SNI 7656. (2012). Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa. In Badan Standardisasi Nasional Indonesia. www.bsn.go.id

Tayyab, S., Ferdous, W., Lokuge, W., Siddique, R., & Manalo, A. (2025). Biochar in cementitious composites: A comprehensive review of properties, compatibility, and prospect of use in sustainable geopolymer concrete. Resources, Conservation & Recycling Advances, 25, 200242. https://doi.org/10.1016/J.RCRADV.2024.200242

Wang, Z., Sun, Y., Zhang, S., & Wang, Y. (2019). Effect of sodium silicate on Portland cement/calcium aluminate cement/gypsum rich-water system: Strength and microstructure. RSC Advances, 9(18), 9993–10003. https://doi.org/10.1039/c8ra09901d

William, M. R., Sembiring, K., Bangun, S., Ranap, P., & Naibaho, T. (2023). Effect of The Use of Wood Charcoal Ash on The Compressive Strength of Normal Concrete. International Journal of Civil Engineering and Infrastructure, 3(2).

Wu, S., Moges, K. A., Vashistha, P., & Pyo, S. (2023). Sustainable cementitious composites with 30% porosity and a compressive strength of 30 MPa. Journal of Materials Research and Technology, 25, 5494–5505. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.036

Zarzuela, R., Luna, M., Carrascosa, L. M., Yeste, M. P., Garcia-Lodeiro, I., Blanco-Varela, M. T., Cauqui, M. A., Rodríguez-Izquierdo, J. M., & Mosquera, M. J. (2020). Producing C-S-H gel by reaction between silica oligomers and portlandite: A promising approach to repair cementitious materials. Cement and Concrete Research, 130, 106008. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2020.106008

Zhao, Z., El-Naggar, A., Kau, J., Olson, C., Tomlinson, D., & Chang, S. X. (2024). Biochar affects compressive strength of Portland cement composites: a meta-analysis. Biochar, 6(1). https://doi.org/10.1007/s42773-024-00309-2