

ANALISIS SERAPAN LARUTAN KARBONAT PADA BETON MUTU TINGGI MEMADAT MANDIRI DENGAN VARIASI SUBSTITUSI METAKAOLIN

Delista Putri Deni^{1*}, Ignatia Wahyu Listyorini Santosa², Ardia Tiara Rahmi³, dan Kholis Hapsari Pratiwi¹

¹Program Studi D3 Teknik Sipil, Sekolah Vokasi, Universitas Sebelas Maret, Jalan Ir. Sutami 36 Ketingan, Jebres, Surakarta, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Jalan Ir. Sutami 36 Ketingan, Jebres, Surakarta, Indonesia

³Program Studi Pendidikan Geografi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sebelas Maret, Jalan Ir. Sutami 36 Ketingan, Jebres, Surakarta, Indonesia

*delistaputri@staff.uns.ac.id

Masuk: 19-09-2024, revisi: 14-10-2024, diterima untuk diterbitkan: 23-10-2025

ABSTRACT

Concrete is often exposed to extreme environmental conditions that affect its durability. One of them is when carbon dioxide in an environment with a certain humidity reacts with hydrated cement minerals and results in carbonation of concrete. Carbonation will penetrate the concrete surface and further result in corrosion of the reinforcement. One method of testing the carbonation of concrete is to expose it to 4% carbonate solution. Therefore, the absorption of carbonate solution in concrete and its relationship with carbonation need to be identified. This study aims to analyze the absorption of carbonate solution and its relationship with the nominal carbonation coefficient of concrete. The object of the study was high strength self-compacting concrete with metakaolin substitution variations of 0%; 10%; 12.5%; 15%; 17.5%; and 20% by weight of cement. The method used was laboratory-based experimental method. The absorption test was conducted based on SNI 03-2914-1992 by soaking 75 mm diameter and 150 mm height concrete cylinder specimens into 4% carbonate solution for 10+0.5 minutes and 24 hours. The results showed that the absorption of carbonate solution in concrete was influenced by the variation of metakaolin substitution and gave a positive correlation with the nominal carbonation coefficient of concrete. Concrete with 15% metakaolin substitution gave the lowest 10+0.5 min and 24 h absorption values of 0.82% and 2.21%, respectively, and the lowest nominal carbonation coefficient of 3.71 mm/year^{1/2}.

Keywords: Absorption; carbonate solution; carbonation; high strength self-compacting concrete; metakaolin

ABSTRAK

Beton seringkali terekspos pada kondisi lingkungan cukup ekstrem yang berpengaruh terhadap durabilitasnya. Salah satunya adalah ketika karbondioksida pada kelembaban tertentu di lingkungan bereaksi dengan mineral semen terhidrasi dan mengakibatkan terjadinya karbonasi beton. Karbonasi akan menembus permukaan beton dan selanjutnya mengakibatkan terjadinya korosi pada tulangan. Salah satu metode pengujian karbonasi beton adalah dengan memaparkannya pada larutan karbonat 4%. Oleh karena itu, penyerapan larutan karbonat pada beton dan hubungannya dengan karbonasi perlu diidentifikasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis serapan larutan karbonat dan hubungannya dengan koefisien karbonasi nominal beton. Objek penelitian adalah beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi substitusi metakaolin sebesar 0%; 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20% terhadap berat semen. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental berbasis laboratorium. Pengujian serapan dilakukan berdasarkan SNI 03-2914-1992 dengan merendam benda uji silinder beton berdiameter 75 mm dan tinggi 150 mm ke dalam larutan karbonat 4% selama 10+0,5 menit dan 24 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa serapan larutan karbonat pada beton dipengaruhi oleh variasi substitusi metakaolin dan memberikan korelasi positif dengan koefisien karbonasi nominal beton. Beton dengan variasi substitusi metakaolin 15% memberikan nilai serapan 10+0,5 menit dan 24 jam terendah yaitu 0,82% dan 2,21%, serta nilai koefisien karbonasi nominal terendah yaitu 3,71 mm/tahun^{1/2}.

Kata kunci: Beton mutu tinggi memadat mandiri; karbonasi; larutan karbonat; metakaolin; serapan

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu bahan konstruksi yang terkenal luas di berbagai sektor karena memiliki keandalan dan durabilitas yang baik, ekonomis, dan mudah untuk diaplikasikan secara luas. Namun demikian, kinerja dari beton terutama beton bertulang dapat terganggu akibat berbagai proses seperti korosi dan penetrasi zat-zat perusak. Salah satu penyebab korosi pada beton bertulang dapat terjadi adalah karena adanya karbonasi (Pravalika & Rao, 2018).

Karbonasi terjadi ketika karbondioksida (CO_2) larut dalam air dalam kelembaban tertentu dan membentuk asam karbonat (H_2CO_3), yang selanjutnya bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sebagai mineral semen terhidrasi membentuk kalsium karbonat (CaCO_3). CaCO_3 tersebut selanjutnya akan menyerang beton sehingga alkalinitas beton berkurang (Wibowo et al., 2020). Reaksi karbonasi tersebut telah dikenal secara luas akan menurunkan derajat keasaman (pH) beton sehingga korosi dapat terjadi dan menurunkan durabilitas beton (Chang & Chen, 2006).

Salah satu metode pengujian karbonasi beton yang direkomendasikan adalah metode *laboratory accelerated carbonation* yang dilakukan dengan memaparkan beton pada lingkungan dengan konsentrasi CO_2 sebesar 4% untuk mengetahui seberapa besar CO_2 dapat terpenetrasi ke dalam beton (Forsdyke & Lees, 2023). Pengujian karbonasi beton melalui media air dilakukan dengan memaparkan beton pada larutan karbonat 4% (Wibowo et al., 2020). Menurut Jackson & Dhir (1996) proses transportasi CO_2 ke dalam beton yang merupakan media semi-permeabel, terjadi melalui pori-pori dalam campuran pasta semen dengan adanya mekanisme absorpsi (penyerapan), permeabilitas (terjadi karena perbedaan tekanan), dan difusi (terjadi karena perbedaan konsentrasi). Semakin banyak pori-pori pada beton memiliki kecenderungan membuat koneksi antar pori semakin tinggi sehingga beton akan semakin mudah dilalui atau terpenetrasi oleh zat perusak melalui media air dan udara, seperti CO_2 . Berdasarkan uraian di atas, dapat ditarik bahwa karbonasi pada beton merupakan hal yang berhubungan dengan penyerapan beton. Oleh karena itu, studi terkait penyerapan karbondioksida melalui media air pada beton dan hubungannya dengan karbonasi perlu dilakukan.

Serapan pada beton melalui media air merupakan salah satu faktor durabilitas, dimana air akan menyebabkan degradasi beton akibat proses kimiawi dan memudahkan intrusi zat perusak ke dalam beton. Sesuai dengan SNI 03-2914-1992, nilai serapan melalui media air kemudian dihitung menggunakan Persamaan 1 sebagai berikut (Badan Standardisasi Nasional, 1992).

$$\text{Serapan (\%)} = \frac{W - W_k}{W_k} \times 100\% \quad (1)$$

dengan W = berat beton kering permukaan jenuh (g) dan W_k = berat beton kering oven (g).

Beton mutu tinggi yang dapat memadat mandiri merupakan salah satu teknologi beton yang diharapkan dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan di atas karena ketahanannya yang lebih baik dalam menghadapi penetrasi zat-zat perusak beton. Berdasarkan SNI 03-6468-2000, beton mutu tinggi didefinisikan sebagai beton yang memiliki kekuatan $\geq 41,4$ MPa (Badan Standardisasi Nasional, 2000). Perbaikan mutu beton untuk mendapatkan karakteristik ini dapat dilakukan dengan penggunaan bahan tambah, salah satunya pozzolan yaitu material alam atau buatan yang mengandung unsur silika dan alumina, seperti *fly ash*, *silica fume*, dan metakaolin (Tjokrodinuljo, 2007). Pozzolan dapat bereaksi dengan kalsium hidrat hasil hidrasi semen dan menghasilkan bahan perekat berupa kalsium silikat hidrat.

Berdasarkan EFNARC (2005), beton memadat mandiri adalah yang mampu secara mandiri memadat dengan nilai *slump* cukup tinggi, tanpa memerlukan penggetaran seperti beton konvensional. Beton memadat mandiri mampu mengalir mencapai kepadatan maksimumnya sendiri karena *flowability*-nya yang tinggi. Beton digolongkan mampu memadat mandiri apabila memenuhi persyaratan parameter *fillingability* hasil *slump flow test* sebesar 660 – 750 mm, *viscosity test* dengan waktu alir diameter sebaran 500 mm ≥ 2 detik, dan *v-funnel test* dengan waktu alir 9 – 25 detik. Pengujian parameter *passingability* dilakukan dengan uji *l-box* dengan syarat perbandingan nilai $h_2/h_1 \geq 0,8$.

Pada penelitian ini, pozzolan yang digunakan adalah metakaolin, yaitu pozzolan yang mengandung banyak unsur silika dan alumina yaitu SiO_2 dan Al_2O_3 dengan ukuran partikel lebih kecil dari *silica fume*. Metakaolin terbentuk sebagai hasil kalsinasi atau pembakaran kaolin pada suhu 450-900°C dan dapat digunakan sebagai pengganti semen. Metakaolin memiliki pengaruh yang signifikan pada reaksi hidrasi semen *Portland*, ketika semen *Portland* terhidrasi, 20-30% massa pasta akan menghasilkan kalsium hidrat yang mudah bereaksi dengan *pozzolan* untuk membentuk bahan perekat. Penambahan metakaolin pada beton akan mempercepat proses hidrasi semen, memberikan *filler effect* dengan ukuran partikelnya yang sangat kecil dan halus, menurunkan porositas beton dan permeabilitas beton, meningkatkan kepadatan beton, dan meningkatkan resistensi terhadap serangan asam dan sulfat (Sambowo, 2002).

Penelitian terkait beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi substitusi metakaolin telah dilakukan sebelumnya. Hasil penelitian Mediyanto & Syaufina (2019) dan Wibowo et al. (2019) menghasilkan bahwa substitusi metakaolin sebesar 15% - 18% terhadap berat semen memberikan peningkatan optimal terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton, serta resistensi terhadap penetrasi air yang ditunjukkan dengan kedalaman penetrasi air dan permeabilitas yang menurun. Hal serupa juga ditunjukkan oleh penelitian Wibowo et al. (2020) dan Deni et al. (2023) yang melakukan substitusi metakaolin terhadap semen pada campuran beton *self-compacting concrete* (SCC) mutu tinggi dengan variasi sebesar 0%; 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20% dengan faktor air semen 0,31 dan penambahan *superplasticizer* BASF MasterGlenium Sky 8851 sebesar 1,5% terhadap berat *binder* menghasilkan proporsi metakaolin optimum sebesar 15% dengan kedalaman karbonasi 5,90 mm; 12,50 mm; dan 16,00 mm pada umur benda

uji 15, 37, dan 51 hari, nilai koefisien karbonasi nominal 3,71 mm/tahun^{1/2}, kedalaman penetrasi klorida 8,10 mm; 17,00 mm; dan 24,10 mm pada umur benda uji 15, 37, dan 51 hari, dan koefisien sorptivitas klorida rata-rata 3,06 x 10⁻² mm/menit^{1/2}. Pengujian karbonasi dilakukan dengan memaparkan benda uji pada larutan karbonat 4% dan pengujian penetrasi klorida dilakukan dengan memaparkan benda uji pada larutan klorida 2%.

Berdasarkan analisis terhadap permasalahan dan penelitian sebelumnya, pada penelitian ini akan dilakukan analisis serapan larutan karbonat dan hubungannya terhadap koefisien karbonasi nominal beton dengan konsentrasi CO₂ sebesar 4%. Objek penelitian adalah beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi substitusi metakaolin sebesar 0%; 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20%. Pengujian serapan dilakukan berdasarkan SNI 03-2914-1992 dengan merendam benda uji silinder beton berdiameter 75 mm dan tinggi 150 mm ke dalam larutan karbonat 4%, sesuai pengujian karbonasi yang telah dilakukan sebelumnya (Wibowo et al., 2020). Penelitian ini diharapkan memberikan gambaran terkait resistensi beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi substitusi metakaolin terhadap karbonasi untuk studi yang lebih komprehensif, dan selanjutnya inovasi beton ini dapat diaplikasikan untuk beton bertulang.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif yang dilaksanakan di Laboratorium Bahan, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret. Objek penelitian adalah beton mutu tinggi memadat mandiri dengan metakaolin dengan variasi substitusi 0%; 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20%. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini dibuat sebanyak 3 buah per variasi uji, berbentuk silinder dengan diameter 75 mm dan tinggi 150 mm

Rancang campur beton

Perencanaan rancang campur beton yang tepat dan sesuai standar dibutuhkan untuk menghasilkan beton berkualitas baik. Rancang campur beton pada penelitian ini sesuai dengan penelitian Wibowo et al. (2020) terkait kedalaman dan koefisien karbonasi beton menggunakan media larutan karbonat 4%, ditunjukkan pada Tabel 1. Rancang campur ini didasarkan pada EFNARC (2005) dan SNI 03-6468-2000 oleh Badan Standardisasi Nasional (2000).

Tabel 1. Rancang campur 1 m³ beton mutu tinggi memadat mandiri (Wibowo et al., 2020)

Benda Uji	Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	Semen (kg)	Metakaolin (kg)	Air (l)	Superplasticizer (l)
MK-S-0%	822,92	802,67	600,00	0,00	186,00	9,00
MK-S-10%	818,10	797,97	540,00	60,00	186,00	9,00
MK-S-12,5%	816,89	796,80	525,00	75,00	186,00	9,00
MK-S-15%	815,69	795,62	510,00	90,00	186,00	9,00
MK-S-17,5%	814,48	794,44	495,00	105,00	186,00	9,00
MK-S-20%	813,28	793,27	480,00	120,00	186,00	9,00

Agregat halus yang digunakan berukuran maksimum 4,75 mm dengan proporsi sebesar 51% dari total agregat, dengan pengujian pendahuluan yang dilakukan adalah uji *specific gravity*, gradasi, kandungan lumpur, dan kandungan zat organik. Agregat kasar yang digunakan berukuran 6,75 – 10 mm dengan proporsi sebesar 49% dari total agregat, dengan pengujian pendahuluan yang dilakukan adalah uji *specific gravity*, gradasi, dan abrasi. Penelitian ini menggunakan *Ordinary Portland Cement* Tipe 1 dengan rasio air dibanding semen 0,31. Metakaolin berasal dari kaolin yang dibakar selama 7 jam pada suhu 700°C dengan kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ masing-masing sebesar 65,89% dan 15,53% berdasarkan hasil uji XRF. *Superplasticizer* menggunakan produk BASF MasterGlenium Sky 8851 dengan proporsi 1,5% dari berat *binder*. Berdasarkan Wibowo et al. (2020) didapat hasil pengujian parameter *self-compacting concrete* (SCC) pada beton segar dengan rancang campur pada Tabel 1. ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian parameter *self-compacting concrete* (Wibowo et al., 2020)

Pengujian	Parameter	Variasi Metakaolin						Standar (EFNARC, 2005)
		0%	10%	12,5%	15%	17,5%	20%	
<i>Slump flow</i>	d (mm)	755,0	742,5	732,5	727,5	717,5	705,0	660 - 750
<i>Viscosity</i>	T ₅₀₀ (detik)	3,11	3,47	3,58	4,23	4,44	4,50	≥ 2
<i>V-funnel</i>	t _v (detik)	10,38	10,45	11,03	11,31	11,57	12,24	9 - 25
<i>L-box</i>	h ₂ /h ₁	0,951	0,938	0,938	0,888	0,886	0,872	≥ 0,8

Berdasarkan Tabel 2. di atas, didapat hasil bahwa pada seluruh variasi persyaratan berdasarkan EFNARC (2005) telah terpenuhi. Persyaratan standar untuk *self-compacting concrete* (SCC) atau beton memadat mandiri adalah untuk persyaratan parameter *fillingability* hasil *slump flow test* sebesar 660 – 750 mm, *viscosity test* dengan waktu alir diameter sebaran 500 mm ≥ 2 detik, dan *v-funnel test* dengan waktu alir 9 – 25 detik. Pengujian parameter *passingability* dilakukan dengan uji *l-box* dengan syarat perbandingan nilai $h_2/h_1 \geq 0,8$. Selain itu, dapat dilihat bahwa berdasarkan hasil tersebut, substitusi metakaolin berpengaruh terhadap workabilitas beton, yang mana semakin tingginya proporsi metakaolin yang disubstitusikan maka nilai workabilitas beton akan menurun dilihat dari parameter *fillingability* dan *passingability*-nya. Hal ini dikarenakan penambahan metakaolin akan membuat campuran beton segar semakin kental.

Pengujian serapan beton

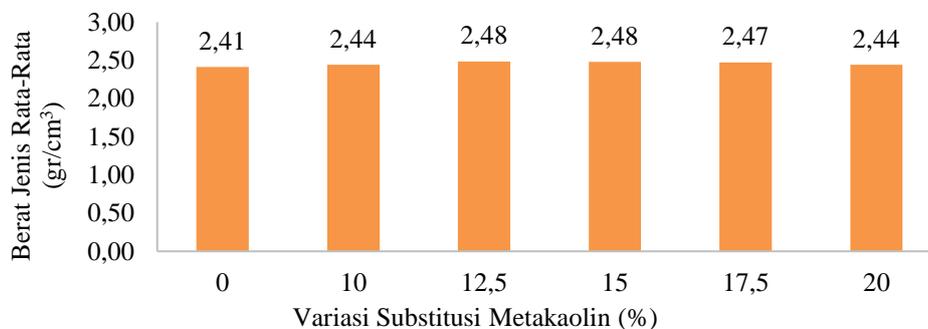
Pengujian serapan beton dilakukan dengan cara pemaparan, dilakukan dengan kondisi lingkungan seperti pada penelitian oleh Wibowo et al. (2020) dan didasarkan pada SNI 03-2914-1992 (Badan Standardisasi Nasional, 1992). Benda uji silinder (diameter = 75 mm, tinggi = 150 mm) masing-masing 3 buah per variasi direndam ke dalam larutan karbonat 4% pada lingkungan terkontrol dan terlindung dengan suhu ruang $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

Langkah pengujian dimulai dengan pengecoran benda uji dan dicetak untuk mengisi bekisting secara mandiri, Setelah 48 jam, benda uji dilepas dari cetakan dan direndam di bak perawatan selama 21 hari. Setelah berumur 28 hari, benda uji dikeringkan dengan cara mengovenya selama 24 jam pada suhu 100°C agar tercapai berat konstan. Setelah dikeluarkan dari oven, seluruh benda uji ditimbang dan dicatat beratnya dalam keadaan kering oven (W). Kemudian, untuk mengetahui penyerapan larutan karbonat 4% pada beton, benda uji direndam selama $10+0,5$ menit dan 24 jam dalam larutan karbonat 4%. Selanjutnya, benda uji dibuat dalam keadaan kering permukaan jenuh (SSD) dengan mengeringkan permukaan benda uji dengan lap dan setelah itu ditimbang untuk mendapatkan berat SSD (W_k). Serapan larutan karbonat 4% pada beton dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 untuk selanjutnya dapat dilakukan analisis terkait hubungan antara serapan dengan karbonasi beton dan parameter lain seperti kuat tekan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berat jenis beton

Berat jenis beton menyatakan perbandingan berat beton terhadap volumenya sendiri. Pengujian berat jenis beton dilakukan pada umur 28 hari. Hasil uji berat jenis beton dapat dilihat pada Gambar 1.

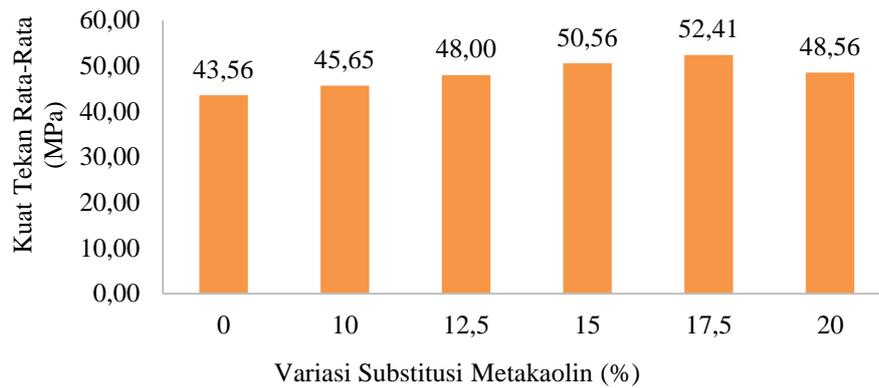


Gambar 1. Berat jenis beton dengan variasi substitusi metakaolin

Berdasarkan Gambar 1. di atas, diperoleh bahwa berat jenis beton dengan variasi substitusi metakaolin menunjukkan *trend* kenaikan dibanding beton tanpa substitusi metakaolin, dengan nilai berat jenis tertinggi pada variasi 12,5% dan 15% substitusi metakaolin. Berdasarkan SNI 03-2847-2002, seluruh variasi beton tergolong dalam kategori beton normal dengan *range* berat jenis 2,2 – 2,5 gr/cm³ (Badan Standardisasi Nasional, 2002).

Kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan beton bertujuan untuk memastikan standar beton mutu tinggi sesuai dengan SNI 03-6468-2000 telah terpenuhi pada penelitian ini, yaitu kuat tekan beton $\geq 41,4$ MPa (Badan Standardisasi Nasional, 2000). Selain itu, pengujian ini juga dilakukan untuk mengetahui hubungan antara nilai serapan dengan kuat tekan beton. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur beton 28 hari. Hasil disajikan pada Gambar 2.

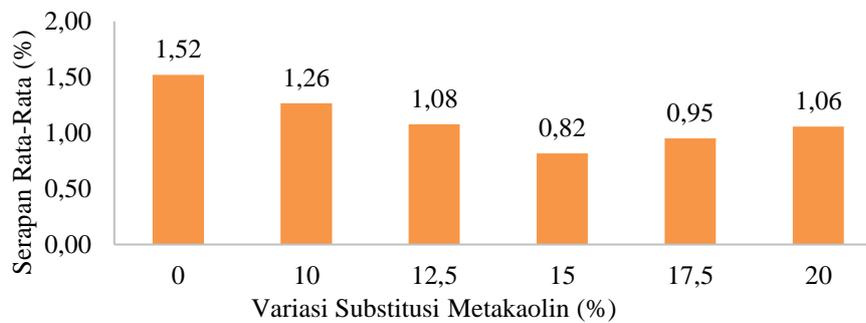


Gambar 2. Kuat tekan beton dengan variasi substitusi metakaolin

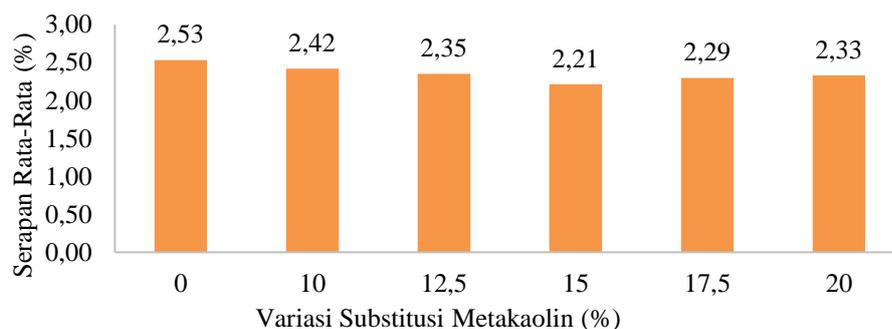
Gambar 2 menunjukkan bahwa substitusi metakaolin terhadap semen menghasilkan kuat tekan beton yang meningkat, hal ini terlihat pada seluruh variasi beton dengan substitusi metakaolin 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20% meningkatkan kuat tekan beton sebesar masing-masing 4,80%; 10,21%; 16,07%; 20,32%; dan 11,49% terhadap beton normal (0% metakaolin). Peningkatan kuat tekan secara optimal terjadi pada substitusi 17,5% dengan nilai 52,41 MPa dan kemudian kembali mengalami penurunan. Namun demikian, seluruh variasi beton menunjukkan nilai kuat tekan lebih dari 41,4 MPa yang artinya telah memenuhi persyaratan beton mutu tinggi sesuai SNI 03-6468-2000 (Badan Standardisasi Nasional, 2000). Peningkatan kuat tekan beton yang terjadi selaras dengan hasil penelitian Deni et al. (2023) dan Sambowo (2002) yang mana hal tersebut terjadi sebagai pengaruh dari substitusi metakaolin terhadap semen meningkatkan kepadatan beton dan memberikan efek *filler* pada beton, sehingga porositas beton berkurang dan kemampuan beton dalam menahan beban tekan meningkat.

Serapan beton

Pengujian serapan beton terhadap larutan karbonat 4% dilakukan pada umur 28 hari. Uji serapan sesuai SNI 03-2914-1992 (Badan Standardisasi Nasional, 1992) akan menunjukkan resistensi beton terhadap larutan karbonat 4% yang termasuk ke dalam air agresif yaitu air yang mengandung zat perusak. Selain itu, dapat ditarik hubungan antara serapan terhadap karbonasi beton pada konsentrasi karbondioksida 4%. Hasil pengujian disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Serapan beton dengan variasi substitusi metakaolin pada perendaman 10+0,5 menit



Gambar 4. Serapan beton dengan variasi substitusi metakaolin pada perendaman 24 jam

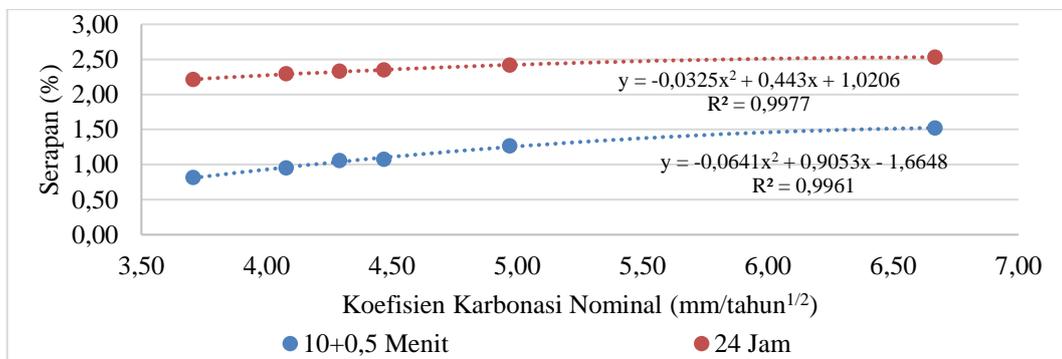
Pengujian yang disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa substitusi metakaolin terhadap berat semen pada beton dapat menurunkan serapan beton terhadap larutan karbonat 4%. Seluruh variasi beton pada 2 variasi waktu perendaman yaitu 10+0,5 menit dan 24 jam menunjukkan *trend* penurunan yang sama, yaitu nilai serapan beton menurun hingga mencapai proporsi optimumnya yaitu 15% dan kembali meningkat pada proporsi 17,5% dan 20%, dengan nilai pada seluruh variasi memberikan hasil yang lebih rendah dibandingkan beton tanpa substitusi metakaolin.

Sesuai dengan teori Jackson & Dhir (1996), dimana semakin banyak pori-pori pada beton memiliki kecenderungan membuat koneksi antar pori semakin tinggi sehingga beton akan semakin mudah dilalui atau terpenetrasi oleh zat perusak melalui media air dan udara, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa menurunnya serapan beton yang terjadi pada penelitian ini sehubungan dengan menurunnya porositas dan permeabilitas beton sebagai efek *filler* metakaolin. Butiran sangat halus metakaolin akan menutup pori-pori beton sehingga beton akan lebih kedap air. Metakaolin akan memperkecil ukuran pori pada pasta semen dan partikel halus di dalamnya dapat diubah menjadi pori non-kontinu sehingga permeabilitas beton secara substansial dapat menurun (Patil et al., 2013). Menurunnya nilai serapan beton tersebut tentunya akan meningkatkan resistensi beton terhadap zat perusak dan meningkatkan durabilitas beton.

Menurut SNI 03-2914-1992, standar maksimum penyerapan beton kedap air normal adalah 2,5% untuk waktu perendaman 10+0,5 menit dan 6,5% untuk waktu perendaman 24 jam, sedangkan untuk air agresif tidak ditetapkan persentase serapan. Nilai serapan beton pada penelitian ini adalah 0,82% - 1,52% pada waktu perendaman 10+0,5 menit dan 2,21% - 2,53% untuk waktu perendaman 24 jam. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai tersebut lebih rendah dari standar maksimum untuk beton kedap air normal.

Hubungan antara serapan dan karbonasi beton

Durabilitas beton merupakan hal yang erat hubungannya dengan kemampuan beton untuk tetap mempertahankan kualitas dan masa layannya ketika beton terpapar zat perusak sebagai hasil dari interaksinya dengan kondisi lingkungan yang mengandung zat perusak, seperti CO₂. Dalam hal tersebut, serapan dan karbonasi merupakan jenis pengujian yang dapat digunakan sebagai parameter durabilitas beton. Pada penelitian ini akan dibandingkan nilai serapan larutan karbonat 4% dengan koefisien karbonasi nominal beton hasil penelitian Wibowo et al., 2020 yang dapat dilihat pada Tabel 3. Pada penelitian tersebut, hasil akhir pengujian karbonasi beton adalah koefisien karbonasi nominal beton yang diproses dari hasil pengujian karbonasi beton pada lingkungan dengan konsentrasi CO₂ sebesar 4% (pemaparan dengan larutan karbonat 4%). Korelasi tersebut disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan serapan dan koefisien karbonasi nominal beton dengan variasi substitusi metakaolin

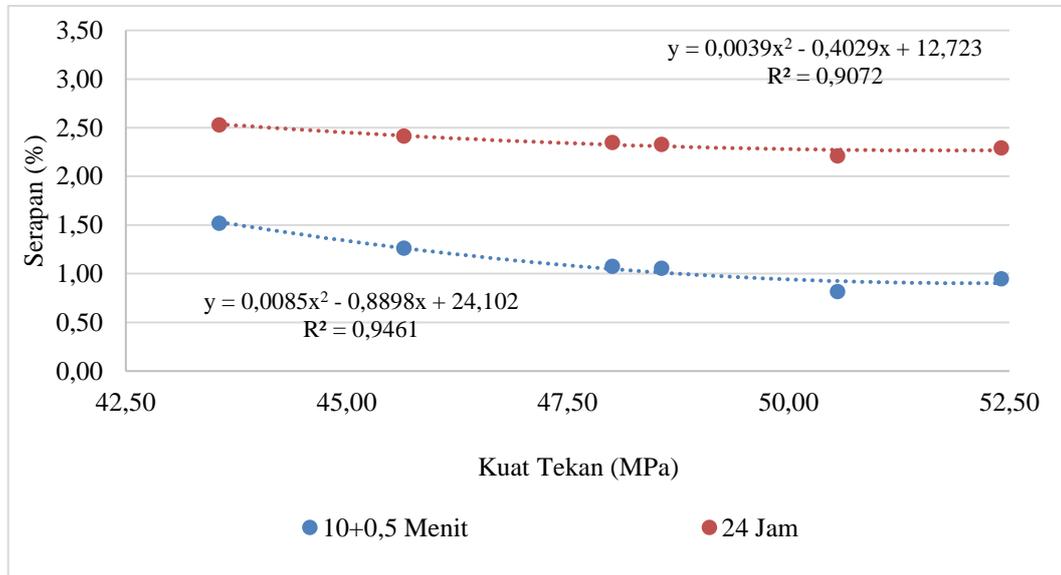
Tabel 3. Hasil pengujian karbonasi beton (Wibowo et al., 2020)

Pengujian	Satuan	Variasi Metakaolin					
		0%	10%	12,5%	15%	17,5%	20%
Koefisien karbonasi nominal	mm/tahun ^{1/2}	6,67	4,97	4,47	3,71	4,08	4,29

Grafik hubungan pada Gambar 5 menunjukkan serapan larutan karbonat dan laju karbonasi beton memiliki hubungan yang linier. Nilai serapan larutan karbonat berbanding lurus dengan koefisien karbonasi nominal beton, semakin tinggi nilai serapan maka semakin tinggi juga nilai koefisien karbonasi nominal beton. Semakin tinggi serapan beton menandakan semakin tingginya tingkat porositas beton, yang artinya beton semakin mudah dilalui atau terpenetrasi oleh cairan atau gas. Semakin mudah beton terpenetrasi zat perusak seperti CO₂ maka semakin tinggi pula laju karbonasi yang terjadi pada beton (Wibowo et al., 2020). Pada penelitian ini, beton dengan metakaolin sebagai material substitusi semen memiliki nilai serapan dan karbonasi lebih rendah dibandingkan dengan beton normal (0% metakaolin).

Hubungan antara serapan dan kuat tekan beton

Kuat tekan beton menyatakan kekuatan beton persatuan luas dalam memikul beban tekan. Kuat tekan beton dapat mengalami penurunan apabila pada masa layannya beton mudah terpenetrasi oleh zat-zat perusak yang erat kaitannya dengan kemampuan beton dalam menyerap zat-zat perusak seperti CO₂. Penelitian ini mengidentifikasi hubungan hubungan antara serapan beton terhadap larutan karbonat 4% dengan kuat tekan beton. Hubungan tersebut disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan serapan dan kuat tekan beton dengan variasi substitusi metakaolin

Gambar 6 menghasilkan nilai serapan beton yang berbanding terbalik dengan nilai kuat tekan beton. Beton dengan nilai serapan rendah memiliki nilai kuat tekan yang tinggi, sebaliknya beton dengan nilai serapan tinggi memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah. Beton dengan penggunaan metakaolin sebagai material substitusi semen memberikan nilai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan beton 0% metakaolin dikarenakan reaksi pozzolanik dan efek *filler*-nya meningkatkan kepadatan beton dan menurunkan porositas dan permeabilitasnya (Patil et al., 2013). Porositas dan permeabilitas beton yang rendah akan memberikan nilai serapan yang lebih rendah karena beton tidak mudah dilalui atau dilewati gas atau cairan.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan sebagai hasil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Nilai serapan larutan karbonat 4% pada beton dipengaruhi oleh proporsi substitusi metakaolin terhadap berat semen. Substitusi metakaolin dapat menurunkan nilai serapan larutan karbonat 4% pada beton. Nilai serapan larutan karbonat terendah terjadi pada beton dengan proporsi substitusi metakaolin 15% dengan nilai serapan pada waktu perendaman 10+0,5 menit dan waktu perendaman 24 jam sebesar 0,82% dan 2,21%, lebih rendah 46,32% dan 12,65% dari beton tanpa substitusi metakaolin.
2. Pada lingkungan larutan karbonat 4%, nilai serapan dan karbonasi beton memberikan hubungan yang berbanding lurus. Hal ini dapat dilihat dari semakin tingginya nilai serapan beton, nilai koefisien karbonasi nominal beton juga semakin tinggi.
3. Nilai serapan beton terhadap larutan karbonat 4% berbanding terbalik dengan nilai kuat tekan pada beton. Beton berkekuatan tekan tinggi memiliki nilai serapan yang rendah dan sebaliknya beton dengan nilai kuat tekan rendah memiliki nilai serapan yang tinggi.
4. Metakaolin dengan reaksi pozzolanik dan efek *filler*-nya mampu meningkatkan kepadatan beton dan mengurangi porositas serta permeabilitas beton, sehingga menurunkan nilai serapan pada beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (1992). *Spesifikasi beton bertulang kedap air* (SNI 03-2914-1992). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *Tata cara perencanaan campuran tinggi dengan semen portland dengan abu terbang* (SNI 03-6468-2000). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>

- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung* (SNI 03-2847-2002). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Chang, C. F., & Chen, J. W. (2006). The experimental investigation of concrete carbonation depth. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1760–1767. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.07.025>
- Deni, D. P., Alfianarrochmah, I., & Kurnianingsih, O. (2023). Penetrasi dan sorptivitas klorida beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi substitusi Metakaolin. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 8(02), 115-126. <https://doi.org/10.29244/jsil.8.02.115-126>
- EFNARC. (2005). *EFNARC 2005 Specification and guidelines for self-compacting concrete*. EFNARC.
- Forsdyke, J. C., & Lees, J. M. (2023). Model fitting to concrete carbonation data with non-zero initial carbonation depth. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 56(1), 1–11. <https://doi.org/10.1617/S11527-023-02104-0/FIGURES/9>
- Jackson, N., & Dhir, R. K. (1996). *Civil engineering materials*. Macmillan Education UK.
- Wibowo, W., Mediyanto, A., & Syaufina, T. R. (2019). Kajian kuat tarik belah pada beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi komposisi Metakaolin dan Superplasticizer Masterease 3029. *Matriks Teknik Sipil*, 7(3), 240–246.
- Patil, S. N., Gupta, A. K., & Deshpande, S. S. (2013). Metakaolin-pozzolan material for cement in high strength concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 46–49.
- Pravalika, A., & Rao, N. V. (2018). Effect of carbonation on the properties of concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(7), 1605–1611. <https://doi.org/10.32861/sr.512.205.214>
- Sambowo, K. A. (2002). *Engineering properties and durability performance of metakaolin and metakaolin - PFA concrete* [Doctoral dissertation, University of Sheffield].
- Tjokrodimuljo, K. (2007). *Teknologi Beton*. Biro Penerbit Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.
- Wibowo, W., Mediyanto, A., & Valentin, S. (2019). Kajian penetrasi dan permeabilitas beton mutu tinggi memadat mandiri terhadap variasi komposisi metakaolin dan superplasticizer MasterEase 3029 kadar 1,9% dari berat binder. *Matriks Teknik Sipil*, 7(3), 247–254. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v7i3.36495>
- Wibowo, W., Safitri, E., & Deni, D. P. (2020). Kajian karbonasi pada beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi komposisi metakaolin. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.20961/jrrs.v4i1.44632>