

Penetrasi dan Sorptivitas Klorida Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri dengan Variasi Substitusi Metakaolin

Delista Putri Deni^{1,*}, 'Ilma Alfianarrochmah¹, dan Oktavia Kurnianingsih¹

¹ Program Studi D3 Teknik Sipil, Sekolah Vokasi, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia, 57126
* penulis koresponden: delistaputri@staff.uns.ac.id

Abstrak: Struktur beton bertulang seringkali terekspos pada lingkungan yang mengandung zat-zat perusak seperti ion klorida. Penetrasi ion klorida akan merusak lapisan pasif pada beton dan mengakibatkan terjadinya korosi, sehingga penggunaan beton berkualitas baik sangat dibutuhkan. Pada penelitian ini, beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi substitusi metakaolin terhadap berat semen sebesar 0% (kontrol); 10%; 12,5%; 15%; 17,5 %; dan 20% digunakan sebagai solusi. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi pengaruh substitusi metakaolin dan kadar optimumnya untuk meningkatkan resistensi beton terhadap penetrasi klorida. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan benda uji silinder beton berdiameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm. Pengujian kedalaman penetrasi klorida menggunakan metode uji penetrasi klorida laboratorium dipercepat, benda uji dipaparkan pada lingkungan klorida dengan konsentrasi 2% dengan variasi waktu pemaparan 15, 37, dan 51 hari dan kemudian dianalisis menggunakan metode AgNO_3 *colorimetric* [1]. Pengujian sorptivitas klorida dilakukan berdasarkan ASTM C.1585 [2] menggunakan variasi waktu 30, 90, dan 1440 menit. Dari hasil penelitian, didapat bahwa substitusi metakaolin 15% merupakan kadar optimum untuk menurunkan penetrasi dan sorptivitas klorida pada beton sebagai kontribusi dari reaksi pozzolaniknya. Penelitian diharapkan dapat bermanfaat sebagai pencegahan kerusakan beton bertulang pada lingkungan agresif dengan menghasilkan analisis beton bermutu baik dan ramah lingkungan.

Kata kunci: Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri; Klorida; Metakaolin; Penetrasi; Sorptivitas.

1. Pendahuluan

Beton adalah material yang digunakan secara luas pada industri konstruksi karena memiliki kekuatan yang baik, mudah dibentuk dan difungsikan untuk berbagai kebutuhan, biaya produksi yang murah, serta aksesibilitas dari material penyusunnya yang mudah didapatkan. Komponen material penyusun beton ini dipilih secara cermat berdasarkan kebutuhan karakteristik mekanik yang diinginkan dan durabilitas yang diperlukan [3]. Beton dengan perkuatan tulangan atau beton bertulang (*reinforced concrete*) adalah salah satu material konstruksi bangunan yang paling banyak digunakan secara luas [4,5]. Struktur beton bertulang seperti jalan raya, dek jembatan, basemen, struktur *marine*, dan bangunan gedung seringkali terekspos pada lingkungan yang mengandung zat-zat perusak struktur [3,6,7], salah satunya ion klorida [4,5]. Ion klorida melalui proses difusi akan bertransportasi ke dalam beton ketika air yang mengandung klorida terpenetrasi pada beton [8]. Ketika kandungan klorida mencapai tingkat kritis, hal tersebut dapat memicu terjadinya korosi pada tulangan baja yang

Diterima: 26 Juli 2023
Disetujui: 19 Agustus 2023

Sitasi:
Deni, D.P.; Alfianarrochmah, I.; Kurnianingsih, O. Penetrasi dan Sorptivitas Klorida Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri dengan Variasi Substitusi Metakaolin. *J. Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2023; 8 (2):115-126.,
<https://doi.org/10.29244/jsil.8.2.115-126>

tertanam pada beton dan menjadi salah satu masalah jangka panjang yang berkaitan dengan kekuatan struktur dan durabilitas beton bertulang [7,8], dengan reaksi seperti **Persamaan (1)**.



Menurut Obla et al. [9], korosi terjadi ketika kandungan ion klorida dalam tingkat kritis terakumulasi pada tulangan baja dan merusak lapisan pelindung pada beton. Kedalaman dimana ion klorida dari lingkungan menyusup ke dalam beton disebut dengan kedalaman penetrasi beton, dimana hal ini sangat bergantung pada kualitas beton dan permeabilitas beton terhadap klorida [3,10].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut dan mewujudkan suatu infrastruktur yang kuat dan memiliki durabilitas baik, sangat penting untuk memproduksi beton dengan kekuatan dan daya tahan yang tinggi, sehingga beton akan memiliki ketahanan terhadap zat-zat perusak. Salah satunya adalah dengan menggunakan beton mutu tinggi memadat mandiri [11], yaitu beton bermutu tinggi (kuat tekan $\geq 41,4$ MPa) yang mampu memadat sendiri sehingga mampu mencapai kepadatan tertingginya sendiri. Di sisi lain, pembuatan beton mutu tinggi memadat mandiri membutuhkan semen dengan jumlah yang lebih banyak daripada beton konvensional, sehingga menghasilkan emisi CO_2 yang cukup besar bagi lingkungan [11].

Produksi semen merupakan salah satu sumber utama emisi karbon dioksida (CO_2) yang tentunya menimbulkan ancaman lingkungan yang besar. Produksi semen berkontribusi sebesar 5-7% dari emisi CO_2 di seluruh dunia [3,12], mengingat semen Portland dikenal luas sebagai bahan pengikat yang paling banyak digunakan dalam beton. Tren peningkatan penggunaan beton telah menyebabkan volume produksi semen Portland meningkat setiap tahunnya [13], sehingga diperkirakan permintaan produksi semen akan melampaui 3,7-4,4 miliar ton dalam tiga puluh tahun ke depan [3,12], terlebih lagi dengan tren penggunaan beton mutu tinggi memadat mandiri [11].

Solusi untuk mengatasi permasalahan emisi CO_2 dari produksi semen tersebut adalah menggunakan material substitusi semen. Beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa rasio air terhadap semen dan penggunaan material substitusi semen seperti pozzolan sangat berpengaruh terhadap parameter kekuatan mekanik, permeabilitas, dan durabilitas beton [4]. Substitusi material pozzolan terhadap semen pada kadar tertentu akan menurunkan porositas beton, sehingga kuat tekan beton meningkat dan permeabilitas beton menurun, yang kemudian durabilitas beton akan meningkat [4,14,15]. Peningkatan durabilitas beton merupakan kontribusi dari peningkatan distribusi ukuran pori dan struktur matriks beton, peningkatan zona transisi interfasi antara agregat dan matriks, serta pengurangan penetrasi dan pengikatan zat-zat yang dapat merusak beton [4,14,16–18]. Material pozzolan yang paling banyak digunakan untuk substitusi semen adalah *silica fume* dan metakaolin. Berdasarkan penelitian, kedua material ini dapat meningkatkan kuat tekan dan menurunkan permeabilitas beton secara tajam pada kadar substitusi yang sama dengan semen [14,19,20].

Metakaolin ($\text{Al}_2\text{SiO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ atau AS_2) merupakan material substitusi semen yang terbentuk sebagai hasil kalsinasi kaolinit murni pada suhu tinggi (500 – 800°C). Aktivasi termal mineral akan memecah struktur kristal melalui dehidroksilasi yang mengarah pada pembentukan aluminosilikat non-kristal [13]. Substitusi metakaolin terhadap semen akan meningkatkan sifat mekanik beton sebagai hasil dari modifikasi produk hidrasi karena aktivitas pozzolanik metakaolin [13]. Hasil penelitian Brykov et al. (2015) [21] terkait pengaruh substitusi metakaolin aktif pada produk hidrasi semen menunjukkan bahwa pasta semen dengan substitusi metakaolin mengandung gel C-S-H dengan rantai aluminosilikat yang lebih panjang dan kandungan *ettringite* yang lebih tinggi. Ini merupakan hasil dari pelepasan ion aluminium yang berasal dari metakaolin, yang kemudian bereaksi untuk menciptakan *ettringite* tambahan.

Beberapa peneliti melaporkan bahwa kuat tekan campuran berbasis semen meningkat seiring dengan substitusi metakaolin terhadap semen pada kadar optimalnya [13,22,23]. Wibowo et al. [22,23] melakukan penelitian dengan mensubstitusikan metakaolin dengan kadar 0-22,5% terhadap berat semen pada beton mutu tinggi memadat mandiri dan mendapatkan hasil bahwa substitusi metakaolin dengan

kadar 15-18% terhadap berat semen memberikan peningkatan optimal terhadap nilai kuat tekan, penetrasi air, penetrasi karbondioksida (karbonasi), dan kuat tarik belah beton. Selain itu, hasil penelitian Ilic et al. (2017) [24] yang mensubstitusi metakaolin sebesar 10% dan 20% (terhadap berat semen) pada mortar menghasilkan peningkatan kekuatan sebesar 5-6% dibandingkan mortar tanpa substitusi metakaolin.

Hasil penelitian terhadap serapan air beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi substitusi metakaolin terhadap berat semen oleh Wibowo et al. (2019) [22] menunjukkan bahwa nilai serapan air pada beton berkurang karena adanya peningkatan kepadatan beton yang teroptimalkan oleh butiran partikel metakaolin yang sangat halus dan mengurangi porositas beton. Serapan air berkurang secara optimal pada kadar substitusi metakaolin 15% terhadap berat semen OPC. Selain itu, produk utama hidrasi semen yang ditemukan adalah *Portlandite* dan *ettringite*, metakaolin akan menurunkan kandungan kalsium hidroksida sebagai hasil dari reaksi pozzolan. Penelitian oleh Badogiannis et al. (2015) [25] terhadap durabilitas beton memadat mandiri dengan substitusi metakaolin juga memberikan pengaruh positif terhadap tingkat porositas beton. Hasil uji penetrasi ion klorida pada beton dengan substitusi metakaolin pada semen atau bubuk batu kapur menghasilkan pengurangan koefisien difusi ion klorida pada beton. Selain itu, dilaporkan juga bahwa substitusi metakaolin dengan kadar 15% dari berat semen akan meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan serapan dengan mengurangi permeabilitas beton [26,27]. Penelitian oleh [13] memberikan hasil bahwa substitusi metakaolin terhadap semen memberikan manfaat teknis, lingkungan (sebagai material alam ramah lingkungan, metakaolin mengurangi penggunaan semen sehingga emisi CO₂ akan berkurang), dan ekonomi bagi industri semen dan beton. Berdasarkan hasil uji *slump flow*, semakin tinggi kadar substitusi yang digunakan, maka flowabilitas campuran akan menurun sehingga diperlukan lebih banyak *superplasticizer*. Substitusi metakaolin juga meningkatkan kuat tekan beton pada berbagai umur hingga 180 hari dibandingkan beton konvensional. Kuat tekan meningkat seiring dengan lamanya waktu perawatan dan penurunan rasio air dan *binder*. Pada penelitian ini dengan rasio air dan *binder* 0,4, kadar substitusi metakaolin optimum untuk meningkatkan kuat tekan adalah 12,5%, sesuai dengan penelitian sebelumnya [28]. Pada kadar substitusi yang sama, penggunaan metakaolin mengurangi kedalaman penetrasi air sebagai efek *filler*, reaksi pozzolan, dan nukleasi yang heterogen. Rasio air terhadap *binder* yang lebih rendah menurunkan volume pori-pori kapiler dan permeabilitas beton. Hal ini mencegah lebih banyak kerusakan, dan dengan demikian, menghasilkan ketahanan *freeze-thaw* yang lebih baik. Berdasarkan uji permeabilitas klorida dipercepat, substitusi metakaolin juga secara signifikan meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi klorida, sesuai penelitian sebelumnya [26]. Hasil pengujian resistivitas permukaan juga menunjukkan bahwa penggunaan MK secara drastis meningkatkan resistivitas listrik dibandingkan dengan beton konvensional sekitar 2-4 kali lebih tinggi untuk substitusi kadar metakaolin 15% terhadap berat semen.

Berdasarkan analisis terhadap berbagai permasalahan di atas, pada penelitian ini beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi substitusi metakaolin terhadap berat semen diinovasikan sebagai solusi, dengan variasi kadar substitusi metakaolin yang digunakan adalah 0% (sebagai kontrol); 10%; 12,5%; 15%; 17,5 %; dan 20%. Penelitian bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh substitusi metakaolin dan kadar optimumnya untuk meningkatkan resistensi beton terhadap penetrasi klorida di berbagai variasi waktu. Uji penetrasi dan sorptivitas klorida dilakukan dengan pemaparan benda uji pada larutan klorida dengan konsentrasi 2%. Pengujian kedalaman penetrasi klorida dilakukan dengan metode uji penetrasi klorida laboratorium dipercepat dan analisis dilakukan dengan metode AgNO₃ *colorimetric* sesuai penelitian Fu et al. (2022) [1]. Pengujian sorptivitas klorida dilakukan berdasarkan ASTM C.1585 (2013) [2]. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat untuk pencegahan kerusakan beton bertulang pada lingkungan yang agresif dengan menghasilkan analisis beton bermutu baik dan ramah lingkungan terhadap penetrasi klorida.

2. Metode

Metode penelitian digunakan adalah metode eksperimental berbasis laboratorium. Penelitian menggunakan benda uji beton silinder dengan diameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm dan di-seal pada bagian samping dan alasnya sebanyak 3 benda uji untuk setiap variasi substitusi metakaolin pada setiap jenis pengujian.

2.1. Material

Mix design atau rancang campur mengacu pada EFNARC [29], SNI 03-6468-2000 [30], dan penelitian sebelumnya oleh Wibowo et al. [22,23]. *Mix design* beton ditunjukkan dalam **Tabel 1**. Metakaolin pada penelitian ini merupakan hasil pembakaran bubuk kaolin halus selama 7 jam pada suhu konstan 700°C dengan kandungan kimiawi ditunjukkan pada **Tabel 2**. *Mix* desain menggunakan faktor air semen 0,31 dan ditambahkan *admixture* berupa *superplasticizer* (BASF MasterGlenium Sky 8851) dengan kadar 1,5% terhadap berat campuran. Benda uji yang digunakan memiliki variasi kadar substitusi metakaolin 0% (sebagai kontrol); 10%; 12,5%; 15%; 17,5 %; dan 20% terhadap berat semen. Benda uji dipaparkan ke dalam lingkungan larutan klorida dengan konsentrasi 2% dengan variasi waktu 15 hari, 37 hari, dan 51 hari untuk pengujian kedalaman penetrasi klorida, serta variasi waktu 30 menit, 90 menit, dan 1440 menit (24 jam) untuk pengujian kedalaman penetrasi klorida.

Tabel 1. Rekapitulasi *Mix Design* Setiap 1 m³ Volume Beton

Material	Kode Benda Uji					
	MK-0%	MK-10%	MK-12,5%	MK-15%	MK-17,5%	MK-20%
Agregat Halus (kg/m ³)	822,92	818,10	816,89	815,69	814,48	813,28
Agregat Kasar (kg/m ³)	802,67	797,97	796,80	795,62	794,44	793,27
Semen (kg/m ³)	600,00	540,00	525,00	510,00	495,00	480,00
Metakaolin (kg/m ³)	0,00	60,00	75,00	90,00	105,00	120,00
<i>Superplasticizer</i> (lt/m ³)	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
Air (lt/m ³)	186,00	186,00	186,00	186,00	186,00	186,00

Sumber: Wibowo (2020) [23]

Tabel 2. Kandungan Metakaolin

Pozzolan	Kandungan Kimiawi (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Lainnya
Metakaolin	65,89	15,53	3,64	5,74	3,54	9,20

2.2. Prosedur Penelitian

Pengujian parameter beton memadat mandiri (*self-compacting concrete*) didasarkan pada EFNARC [29] dengan melakukan pengujian terhadap parameter *fillingability* menggunakan kerucut abrams, papan alir, dan alat uji *V-funnel* serta parameter *passingability* menggunakan alat uji *L-box*. Pengujian kuat tekan didasarkan pada ASTM C-39 [31] menggunakan benda uji silinder beton berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm pada umur benda uji 28 hari.

Pengujian penetrasi klorida dengan metode pemaparan lingkungan klorida didasarkan pada penelitian [23] dan metode analisis *colorimetric* AgNO₃ [1]. Benda uji dicor pada bekisting, dilepas dari cetakan setelah 48 jam dan direndam di bak *curing* hingga umur 21 hari. Ketika benda uji telah mencapai umur 28 hari, benda uji dioven hingga mencapai berat konstan pada suhu 100°C selama 24 jam. Kemudian, benda uji di-seal pada bagian samping dan alasnya, kemudian dipaparkan pada lingkungan klorida terkontrol (larutan klorida 2%). Pada umur 15 hari, benda uji pada berbagai variasi kadar

substitusi metakaolin dibelah dan disemprot larutan AgNO_3 0,1 mol/L untuk selanjutnya diukur kedalaman penetrasi klorida berdasarkan analisis *colorimetric* AgNO_3 . Hal yang sama berlaku untuk benda uji umur 37 dan 51 hari.

Pengujian sorptivitas klorida dengan metode pemaparan lingkungan klorida didasarkan pada ASTM C.1585 [2]. Benda uji dicor pada bekisting, dilepas dari cetakan setelah 48 jam dan direndam di bak *curing* hingga umur 21 hari. Ketika benda uji telah mencapai umur 28 hari, benda uji dioven hingga mencapai berat konstan pada suhu 100°C selama 24 jam. Kemudian, benda uji di-seal pada bagian samping dan alasnya, kemudian dipaparkan pada lingkungan klorida terkontrol (larutan klorida 2%). Setelah benda uji direndam selama 30 menit, benda uji pada berbagai variasi kadar substitusi metakaolin ditimbang untuk selanjutnya dianalisis nilai koefisien sorptivitas klorida dengan **Persamaan (3) dan Persamaan (4)**. Hal yang sama dilakukan pada variasi waktu 90 menit dan 24 jam.

2.2.1. Penetrasi Klorida pada Beton

Permasalahan korosi yang disebabkan oleh penetrasi klorida menjadi salah satu mekanisme utama yang signifikan pada kerusakan beton bertulang. Penetrasi ion klorida pada lapisan pelindung beton hingga mencapai permukaan tulangan baja akan merusak lapisan pasif dan mempercepat terjadinya korosi, yang pada akhirnya akan mengurangi durabilitas beton bertulang [1]. Beton yang terkontak zat agresif dari lingkungan akan mengalami deteriorisasi secara fisik maupun kimia. Secara umum, beton dengan tingkat porositas dan permeabilitas rendah memiliki resistensi yang lebih baik terhadap penetrasi zat-zat perusak. Selain itu, konsentrasi dan jenis zat agresif juga berpengaruh terhadap laju penetrasi [8,22,23].

Analisis *colorimetric* [32,33] merupakan metode yang banyak digunakan secara luas untuk mengkarakterisasikan kandungan klorida di dalam material berbasis semen. Peneliti menggunakan larutan AgNO_3 [34] atau larutan $\text{AgNO}_3 + \text{K}_2\text{CrO}_4$ [32,33] untuk mempelajari penetrasi klorida pada material berbasis semen. Reaksi ion perak dan ion klorida dalam larutan pori membentuk warna putih AgCl pada daerah yang terkontaminasi klorida, sedangkan pada daerah yang tidak terkontaminasi klorida, kombinasi ion perak dan ion hidroksida akan membentuk AgOH yang tidak stabil, dan selanjutnya menghasilkan warna coklat Ag_2O . Batas warna antara putih dan coklat dapat digunakan untuk menentukan kedalaman penetrasi klorida. Meskipun demikian, analisis warna tidak dapat mengkarakterisasi secara kuantitatif distribusi kandungan klorida dan kedalaman penetrasi dipengaruhi oleh konsentrasi AgNO_3 . Berdasarkan penelitian oleh Fu et al. [1], hasil analisis *colorimetric* AgNO_3 tergantung pada konsentrasi larutan AgNO_3 yang digunakan. Ketika konsentrasi AgNO_3 yang digunakan semakin tinggi, maka nilai kedalaman penetrasi klorida akan semakin rendah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa larutan AgNO_3 dengan konsentrasi 0,1 mol/L dapat digunakan untuk mengukur kedalaman penetrasi klorida, dengan reaksi reaksi seperti **Persamaan (2)** sebagai berikut.



2.2.2. Sorptivitas Klorida pada Beton

Korosi pada beton biasanya berhubungan dengan ion klorida dari air laut atau lingkungan yang mengandung garam. Permasalahan ini mengindikasikan diperlukannya suatu penelitian untuk meningkatkan kualitas dan rancang campur beton dalam menghadapi intrusi ion klorida yang terpenetrasi ke dalam beton melalui proses difusi zat pelarut [8]. Oleh karena itu, sesuai ASTM C.1585 [2], nilai sorptivitas larutan klorida pada beton dapat dihitung menggunakan **Persamaan (3)** sebagai berikut.

$$k_s = \frac{i}{t^{0,5}} \quad (3)$$

dengan,

k_s : koefisien sorptivitas

- i : kumulatif serapan
t : waktu pemaparan

Nilai kumulatif serapan dapat dihitung menggunakan **Persamaan (4)** sebagai berikut.

$$i = \frac{\Delta m}{a \rho} \quad (4)$$

dengan,

- i : kumulatif serapan
 Δm : perubahan massa
a : luas permukaan terekspos
 ρ : massa jenis larutan

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Beton Segar

Pengujian beton segar memadat mandiri pada penelitian ini didasarkan pada EFNARC [29] terhadap parameter *fillingability* melalui uji *slump flow*, *viscosity*, dan *V-funnel* serta parameter *passingability* melalui uji *L-box*. Hasil pengujian parameter beton memadat mandiri disajikan pada **Tabel 3**.

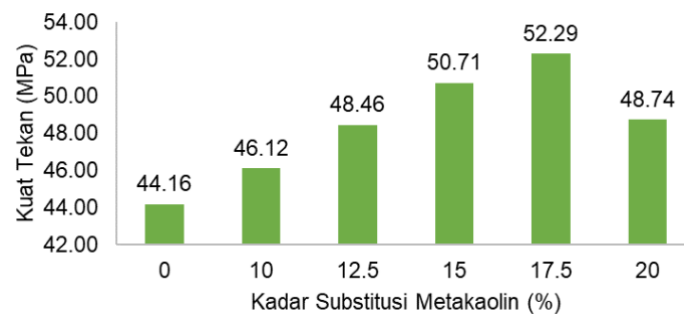
Tabel 3. Hasil Pengujian Parameter Beton Memadat Mandiri

Kode Benda Uji	Uji <i>Slump Flow</i>	Uji <i>Viscosity</i>	Uji <i>V-funnel</i>	Uji <i>L-box</i>
	d (mm)	T ₅₀₀ (detik)	t _v (detik)	h ₂ /h ₁ (mm)
SCC-MK-0%	750,00	3,14	10,42	0,94
SCC-MK-10%	740,00	3,50	10,44	0,93
SCC-MK-12,5%	730,00	3,56	11,01	0,91
SCC-MK-15%	727,50	4,20	11,28	0,88
SCC-MK-17,5%	720,00	4,39	11,44	0,89
SCC-MK-20%	702,50	4,51	12,39	0,85

Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh hasil pengujian untuk parameter *fillingability* melalui uji *slump flow*, *viscosity* dan *V-funnel* dan parameter *passingability* melalui uji *L-box* untuk beton memadat mandiri telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh EFNARC [29]. Seluruh benda uji untuk parameter *filling ability* termasuk ke dalam persyaratan kategori beton untuk pengaplikasian normal (SF2 *slump flow test*, VS2 *viscosity test*, dan VF2 *V-funnel test*), dengan nilai 660 – 750 mm untuk uji diameter *slump flow*, lebih dari sama dengan 2 detik untuk waktu alir diameter sebaran 500 mm pada uji *viscosity*, dan waktu alir *V-funnel* berada di antara 9 – 25 detik. Pada pengujian parameter *passingability*, seluruh benda uji telah memenuhi persyaratan untuk kategori beton untuk pengaplikasian 2 *rebar* maupun 3 *rebar* (PA1 dan PA2 *L-box test*), dengan nilai h₂/h₁ lebih dari sama dengan 0,8 mm. Dari **Tabel 3** juga dapat disimpulkan bahwa kadar substitusi metakaolin mempengaruhi workabilitas dari beton segar. Kadar substitusi metakaolin terhadap berat semen yang semakin tinggi akan membuat maka workabilitas beton semakin rendah yang terlihat dari semakin rendah nilai diameter sebaran (d) dan nilai perbandingan antara h₂/h₁, serta semakin tinggi waktu yang dibutuhkan oleh beton segar untuk mengalir (T₅₀₀ dan t_v). Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya oleh [13,22,23,35], dimana metakaolin memiliki sifat seperti lempung yang menyebabkan metakaolin lebih mudah menyerap air daripada semen. Tertutupnya pori dalam campuran dengan luas permukaan metakaolin yang tinggi akan meningkatkan *demand* metakaolin terhadap air untuk mencapai *flow* tertentu [13].

3.2. Pengujian Kuat Tekan Beton

Kuat tekan seluruh benda uji dengan variasi kadar substitusi metakaolin terhadap berat semen pada umur 28 hari ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Pengaruh Kadar Substitusi Metakaolin terhadap Kuat Tekan Beton

Berdasarkan **Gambar 1** di atas, terlihat bahwa kadar substitusi metakaolin terhadap berat semen berpengaruh terhadap kuat tekan beton mutu tinggi memadat mandiri. Seluruh beton dengan substitusi metakaolin memberikan nilai kuat tekan lebih tinggi dibandingkan beton tanpa substitusi metakaolin. Kuat tekan beton meningkat seiring dengan peningkatan kadar substitusi metakaolin hingga nilai optimumnya dan kemudian menurun ketika kadar optimum substitusi metakaolin telah terlampaui. Beton dengan kadar substitusi metakaolin 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20% masing-masing memberikan peningkatan nilai kuat tekan sebesar 4,43%; 9,74%; 14,83%; 18,41%; dan 10,36% dengan substitusi kadar 17,5% memberikan nilai peningkatan terbesar terhadap kuat tekan. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh [13,19,22] dimana metakaolin melalui efek pengenceran, efek pengisian, dan reaksi pozzolaniknya dengan kalsium hidroksida meningkatkan kepadatan beton sehingga kuat tekan beton meningkat. Akan tetapi, substitusi kadar metakaolin yang melebihi kadar optimumnya cenderung akan menurunkan kuat tekan beton karena mengurangi persentase semen sebagai *binder* utama beton sehingga reaksi hidrasi semen dengan metakaolin tidak optimal [23].

3.3. Pengujian Penetrasi Klorida pada Beton

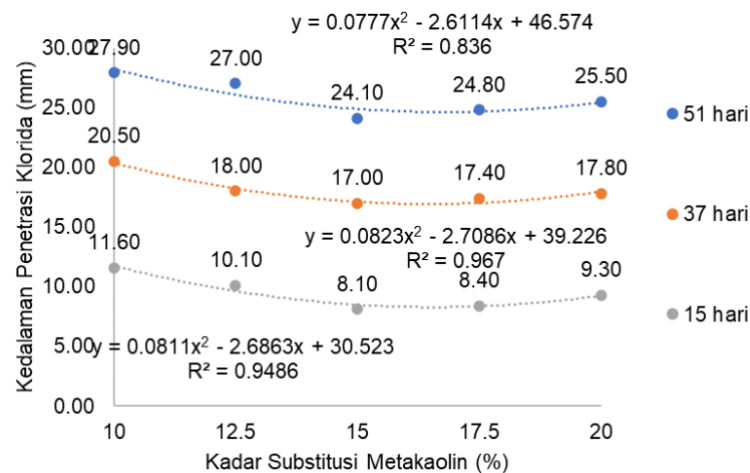
Pengujian penetrasi klorida dilakukan dengan metode pengujian laboratorium dipercepat dengan memaparkan benda uji pada larutan klorida dengan konsentrasi 2% pada variasi waktu 15 hari, 37 hari, dan 51 hari. Pada ketiga variasi waktu tersebut, dilakukan pengujian AgNO_3 *colorimetric* dengan menyemprotkan larutan AgNO_3 0,1 mol/L pada benda uji. Setelah disemprot, bagian beton yang terpenetrasi klorida akan berubah warna menjadi putih karena terbentuk AgCl pada daerah yang terkontaminasi klorida, sedangkan pada daerah yang tidak terkontaminasi klorida kombinasi ion perak dan ion hidroksida akan membentuk AgOH yang tidak stabil dan selanjutnya menghasilkan warna coklat Ag_2O . Batas antara warna putih dan coklat ini digunakan untuk mengukur kedalaman penetrasi klorida seperti pada **Gambar 2**. Kemudian, hasil pengujian kedalaman penetrasi klorida pada beton disajikan pada **Tabel 4** dan **Gambar 3**.



Gambar 2. Pengujian Penetrasi Klorida pada Beton

Tabel 4. Hasil Pengujian Penetrasi Klorida

Kode Benda Uji	Kedalaman Penetrasi Klorida (mm)		
	15 Hari	37 Hari	51 Hari
PK-MK-0%	12,10	21,70	28,40
PK-MK-10%	11,60	20,50	27,90
PK-MK-12,5%	10,10	18,00	27,00
PK-MK-15%	8,10	17,00	24,10
PK-MK-17,5%	8,40	17,40	24,80
PK-MK-20%	9,30	17,80	25,50

**Gambar 3.** Hubungan Kedalaman Penetrasi Klorida dengan Kadar Substitusi Metakaolin

Tabel 4 dan **Gambar 3** menunjukkan bahwa nilai kedalaman penetrasi klorida berbanding lurus dengan waktu pemaparan. Semakin lama waktu pemaparan benda uji pada larutan klorida, maka semakin tinggi pula nilai kedalaman penetrasi klorida pada beton. Selain itu, ketiga variasi waktu pemaparan klorida pada beton menghasilkan pola yang sama terhadap kedalaman penetrasi klorida pada beton. Kedalaman penetrasi tertinggi terjadi pada benda uji kontrol dengan kadar substitusi metakaolin 0% dengan nilai masing-masing 12,10 mm; 21,70 mm; dan 28,40 mm untuk variasi waktu 15, 37, dan 51 hari. Pada benda uji dengan kadar substitusi metakaolin 10% kedalaman penetrasi menurun sebesar 4,13%; 5,53%; dan 1,76% dari benda uji kontrol menjadi 11,60 mm; 20,50 mm; dan 27,90 mm. Pada benda uji dengan kadar substitusi metakaolin 12,5% kedalaman penetrasi menurun sebesar 16,53%; 17,05%; dan 4,93% dari benda uji kontrol menjadi 10,10 mm; 18,00 mm; dan 27,00 mm. Benda uji dengan kadar substitusi metakaolin 15% memberikan penurunan kedalaman penetrasi klorida paling optimum sebesar 33,06%; 21,66%; dan 15,14% dari benda uji kontrol dengan nilai 8,10 mm; 17,00 mm; dan 24,10 mm. Selanjutnya, pada benda uji dengan kadar substitusi metakaolin 17,5% kedalaman penetrasi kembali meningkat akan tetapi lebih rendah daripada benda uji kontrol. Pada kadar ini terjadi penurunan kedalaman penetrasi sebesar 30,58%; 19,82%; dan 12,68% dari benda uji kontrol dengan nilai 8,40 mm; 17,40 mm; dan 24,80 mm. Pada benda uji dengan kadar substitusi metakaolin 20% kedalaman penetrasi terus meningkat dengan nilai yang lebih rendah daripada benda uji kontrol. Pada kadar ini terjadi penurunan kedalaman penetrasi sebesar 23,14%; 17,97%; dan 10,21% dengan nilai 9,30 mm; 17,80 mm; dan 25,50 mm. Sehingga, didapat kesimpulan bahwa sama halnya dengan hasil pengujian kuat tekan, substitusi kadar metakaolin terhadap berat semen meningkatkan kualitas beton dengan menurunkan kedalaman penetrasi klorida pada beton hingga kadar optimumnya dan kadar penetrasi klorida akan cenderung meningkat kembali ketika kadar optimum substitusi telah

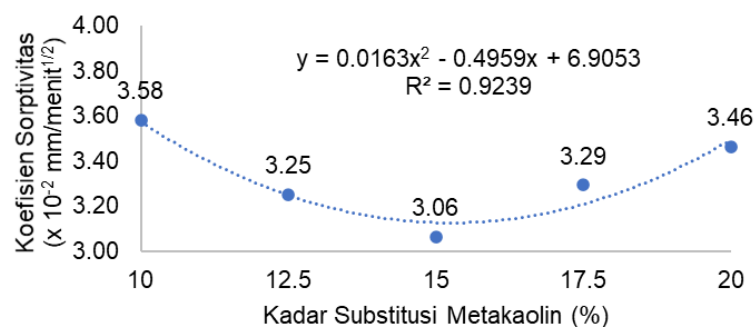
terlampau. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh [13] dimana substitusi metakaolin terhadap berat semen pada kadar tertentu akan meningkatkan resistensi beton terhadap penetrasi klorida sebagai kontribusi dari reaksi pozzolanik metakaolin dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Reaksi pozzolanik metakaolin akan meningkatkan kelekatan agregat melalui reaksi kimia dan *filler effect* dari metakaolin yang mengisi rongga sehingga porositas dan permeabilitas beton terhadap intrusi zat perusak berkurang dan mengurangi kedalaman penetrasi klorida yang terjadi pada beton [13,14,23].

3.4. Pengujian Sorptivitas Klorida pada Beton

Laju penetrasi klorida pada beton sangat erat kaitannya dengan sorptivitas beton, yaitu laju kecepatan beton dalam menyerap zat cair. Semakin mudah beton dilalui oleh gas maupun zat cair, maka semakin tinggi probabilitas beton untuk terpenetrasi zat-zat perusak dan durabilitas beton akan berkurang. Maka dari itu, pengujian sorptivitas beton terhadap klorida dilakukan untuk mengetahui kecepatan beton dalam menyerap larutan klorida 2% dalam satuan waktu. Hasil pengujian sorptivitas klorida pada 3 variasi waktu pemaparan 30 menit, 90 menit, dan 24 jam (1440 menit) menghasilkan koefisien sorptivitas beton terhadap larutan klorida 2% seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 5** dan disajikan secara grafis pada **Gambar 4**.

Tabel 5. Hasil Pengujian Sorptivitas Klorida

Kode Benda Uji	Koefisien Sorptivitas ($\times 10^{-2}$ mm/menit ^{1/2})			
	30 Menit	90 Menit	1440 Menit	Rata-rata
SK-MK-0%	3,69	3,77	3,83	3,76
SK-MK-10%	3,64	3,56	3,55	3,58
SK-MK-12,5%	3,16	3,35	3,24	3,25
SK-MK-15%	2,99	3,20	3,00	3,06
SK-MK-17,5%	3,26	3,29	3,33	3,29
SK-MK-20%	3,37	3,48	3,54	3,46



Gambar 4. Hubungan Koefisien Sorptivitas Klorida dengan Kadar Substitusi Metakaolin

Berdasarkan **Tabel 5** dan **Gambar 4**, didapatkan hasil bahwa substitusi metakaolin terhadap berat semen akan menurunkan nilai sorptivitas beton terhadap larutan klorida 2% dengan kadar substitusi metakaolin teroptimum adalah 15%. Nilai koefisien sorptivitas benda uji kontrol dengan substitusi metakaolin 0% terhadap berat semen adalah sebesar $3,76 \times 10^{-2}$ mm/menit^{1/2}. Substitusi metakaolin terhadap berat semen dengan kadar 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20% memberikan penurunan koefisien sorptivitas beton terhadap benda uji kontrol masing-masing sebesar 4,78%; 13,64%; 18,60%; 12,49%; dan 7,97% dengan nilai koefisien sorptivitas $3,58 \times 10^{-2}$ mm/menit^{1/2}; $3,25 \times 10^{-2}$ mm/menit^{1/2}; $3,06 \times 10^{-2}$ mm/menit^{1/2}; $3,29 \times 10^{-2}$ mm/menit^{1/2}; $3,46 \times 10^{-2}$ mm/menit^{1/2}. Pengujian sorptivitas tersebut erat kaitannya dengan porositas beton. Semakin bertambah kecil nilai koefisien sorptivitas, maka

semakin kecil nilai porositas beton dan ketahanan beton terhadap intrusi zat cair akan meningkat. Sejalan dengan hasil pengujian kuat tekan dan kedalaman penetrasi klorida, substitusi kadar metakaolin terhadap berat semen meningkatkan kualitas beton dengan menurunkan koefisien sorptivitas klorida pada beton hingga kadar optimumnya dan koefisien sorptivitas klorida akan cenderung meningkat kembali ketika kadar optimum substitusi telah terlampaui. Menurunnya koefisien sorptivitas beton sejalan dengan berkurangnya porositas beton sebagai kontribusi dari metakaolin dengan partikelnya yang sangat kecil dan mengisi rongga-rongga pada beton [22].

3.5. Pengaruh Metakaolin terhadap Durabilitas Beton

Penetrasi dan permeabilitas beton merupakan beberapa parameter yang secara signifikan menentukan durabilitas beton. Pada beton mutu tinggi memadat mandiri dengan substitusi metakaolin terhadap berat semen, metakaolin dengan reaksi pozzolaniknya sangat berpengaruh terhadap parameter tersebut. Berdasarkan penelitian ini, metakaolin dengan reaksi pozzolaniknya mampu menurunkan laju penetrasi klorida pada beton dengan mengubah Ca(OH)_2 menjadi kalsium silikat hidrat tambahan yang akan meningkatkan kelekatan agregat yang terkandung pada beton melalui reaksi kimiawi, sehingga kuat tekan beton meningkat dan porositas beton berkurang. Metakaolin dengan ukuran agregatnya yang sangat halus dan senyawa kalsium silikat hidrat yang dihasilkan meningkatkan kepadatan beton, menutup rongga pada beton menjadi rongga non-kontinu, sehingga permeabilitas beton dapat berkurang dan resistensi terhadap penetrasi zat-zat perusak seperti klorida meningkat. Rongga yang semakin kecil dan tertutupnya jaringan antar rongga akan mampu memutus hubungan antara rongga dengan zona antarmuka sehingga kemampuan beton dalam menyerap zat cair maupun gas berkurang [22,23]. Dengan berkurangnya laju penetrasi dan permeabilitas beton, maka durabilitas beton akan meningkat karena beton akan memiliki resistensi yang lebih baik terhadap zat-zat perusak. Akan tetapi, substitusi metakaolin terhadap berat semen yang melebihi kadar optimumnya tidak disarankan karena akan mengurangi workabilitas dan homogenitas campuran karena reaksi hidrasi yang tidak optimal.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, didapat kesimpulan bahwa substitusi metakaolin terhadap berat semen pada beton hingga kadar optimumnya meningkatkan kualitas beton mutu tinggi memadat mandiri dengan meningkatkan kuat tekan beton, menurunkan kedalaman penetrasi klorida pada beton, dan menurunkan sorptivitas klorida pada beton melalui reaksi pozzolaniknya. Kadar substitusi metakaolin optimal untuk meningkatkan kuat tekan beton adalah 17,5% sedangkan untuk menurunkan kedalaman penetrasi dan sorptivitas klorida pada beton adalah 15%. Metakaolin menurunkan workabilitas beton seiring dengan bertambahnya kadar substitusi metakaolin terhadap berat semen berdasarkan uji *slump-flow*, *viscosity*, *V-funnel*, dan *L-box* namun tetap memenuhi persyaratan beton memadat mandiri untuk pengaplikasian normal sesuai EFNARC [29].

Daftar Pustaka

- [1] Fu C, Li S, He R, Zhou K, Zhang Y. Chloride profile characterization by electron probe microanalysis, powder extraction and AgNO_3 colorimetric: A comparative study. *Constr Build Mater.* 2022 Jul 25;341:127892.
- [2] ASTM International. ASTM C1585 – Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM International; 2013. p. 1–6.
- [3] Abdulalim Alabdullah A, Iqbal M, Zahid M, Khan K, Nasir Amin M, Jalal FE. Prediction of rapid chloride penetration resistance of metakaolin based high strength concrete using light GBM and XGBoost models by incorporating SHAP analysis. *Constr Build Mater.* 2022 Aug 22;345:128296.
- [4] Tadayon MH, Shekarchi M, Tadayon M. Long-term field study of chloride ingress in concretes

- containing pozzolans exposed to severe marine tidal zone. *Constr Build Mater*. 2016 Oct 1;123:611–6.
- [5] Wu L, Li W, Yu X. Time-dependent chloride penetration in concrete in marine environments. *Constr Build Mater*. 2017 Oct 15;152:406–13.
- [6] Hilloulin B, Tran VQ. Using machine learning techniques for predicting autogenous shrinkage of concrete incorporating superabsorbent polymers and supplementary cementitious materials. *J Build Eng*. 2022 May 15;49.
- [7] Isteita M, Xi Y. The effect of temperature variation on chloride penetration in concrete. *Constr Build Mater*. 2017 Dec 15;156:73–82.
- [8] Hardianti H, Kristiawan SA, Wibowo. Pengaruh Konsentrasi Klorida Terhadap Laju Penetrasi Ion Klorida Ke Dalam Beton High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete (HVFA-SCC). *e-Jurnal Matriks Tek Sipil*. 2017;(September):974–80.
- [9] Obla K, Lobo C, Hong R, Berke N. Evaluation of Chloride Limits for Reinforced Concrete Phase A. National , Silver Spring, MD. 2017 Jul 1. Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). 2017.
- [10] Carmichael M, Arulraj G. Rapid chloride permeability test on concrete with nano materials. *Int J Eng Adv Technol*. 2019;8(3).
- [11] Choudhary R, Gupta R, Nagar R. Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. *Constr Build Mater*. 2020 Apr 10;239:117888.
- [12] Adel H, Ghazaan MI, Korayem AH. Machine learning applications for developing sustainable construction materials. *Artif Intell Data Sci Environ Sens*. 2022 Jan 1;179–210.
- [13] Joshaghani A, Moeini MA, Balapour M. Evaluation of incorporating metakaolin to evaluate durability and mechanical properties of concrete. *Adv Concr Constr*. 2017;5(3):241–55.
- [14] Valipour M, Pargar F, Shekarchi M, Khani S, Moradian M. In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. *Constr Build Mater [Internet]*. 2013;46:63–70. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.026>
- [15] Flores Medina N, Barluenga G, Hernández-Olivares F. Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement. *Constr Build Mater [Internet]*. 2015;96:556–66. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.050>
- [16] Shi X, Xie N, Fortune K, Gong J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Constr Build Mater*. 2012 May;30:125–38.
- [17] Duan P, Shui Z, Chen W, Shen C. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Constr Build Mater*. 2013;44:1–6.
- [18] Dousti A, Rashetnia R, Ahmadi B, Shekarchi M. Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite. *Constr Build Mater*. 2013;49:393–9.
- [19] Valipour M, Pargar F, Shekarchi M, Khani S. Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Constr Build Mater [Internet]*. 2013;41:879–88. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.054>
- [20] Poon CS, Kou SC, Lam L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Constr Build Mater*. 2006 Dec 1;20(10):858–65.
- [21] Brykov A, Krasnobaeva S, Mokeev M. Hydration of portland cement in the presence of highly reactive metakaolin. *Mater Sci Appl*. 2015;6(5):391.
- [22] Wibowo W, Mediyanto A, Valentin S. Kajian Penetrasi dan Permeabilitas Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri terhadap Variasi Komposisi Metakaolin dan Superplasticizer MasterEase 3029 Kadar 1,9% dari Berat Binder. *Matriks Tek Sipil*. 2019;7(3):247–54.

- [23] Wibowo W, Safitri E, Deni DP. Kajian Karbonasi Pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Komposisi Metakaolin. *J Ris Rekayasa Sipil*. 2020;4(1):1.
- [24] Ilić B, Radonjanin V, Malešev M, Zdujić M, Mitrović A. Study on the addition effect of metakaolin and mechanically activated kaolin on cement strength and microstructure under different curing conditions. *Constr Build Mater*. 2017;133:243–52.
- [25] Badogiannis EG, Sfikas IP, Voukia DV, Trezos KG, Tsivilis SG. Durability of metakaolin self-compacting concrete. *Constr Build Mater*. 2015;82:133-141.
- [26] Bu J, Tian Z. Relationship between pore structure and compressive strength of concrete: Experiments and statistical modeling. *Sādhanā*. 2016;41(3):337–44.
- [27] Taфраoui A, Escadeillas G, Vidal T. Durability of the ultra high performances concrete containing metakaolin. *Constr Build Mater*. 2016;112:980-987.
- [28] El-Din HKS, Eisa AS, Aziz BHA, Ibrahim A. Mechanical performance of high strength concrete made from high volume of metakaolin and hybrid fibers. *Constr Build Mater*. 2017;140:203–9.
- [29] EFNARC. EFNARC 2005 Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC; 2005.
- [30] Badan Standardisasi Nasional. SNI 03-6468-2000 Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi Dengan Semen Portland Dengan Abu Terbang. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional; 2000.
- [31] ASTM International. ASTM C-39 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken; 2014.
- [32] Baroghel-Bouny V, Belin P, Maultzsch M, Henry D. AgNO₃ spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 1: Non-steady-state diffusion tests and exposure to natural conditions. *Mater Struct*. 2007;40:759–781.
- [33] Baroghel-Bouny V, Belin P, Maultzsch M, Henry D. AgNO₃ spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 2: Non-steady-state migration tests and chloride diffusion coefficients. *Mater Struct*. 2007;40:783–799.
- [34] Otsuki N, Nagataki S, Nakashita K. Evaluation of the AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials. *Constr Build Mater*. 1993;7:195–201.
- [35] Mediyanto A, Syaufina R. Mandiri Dengan Variasi Komposisi Metakaolin Dan Superplasticizer Masterease 3029. 2019;(September):240–6.