

KAJIAN PERMEABILITAS PADA BETON MEMADAT MANDIRI MUTU TINGGI DENGAN METAKAOLIN 12,5% DAN VARIASI SILICA FUME PADA TEKANAN 1 KG/CM²

Endah Safitri^{1)*}, Wibowo²⁾, Farida Dzakiyyah Puspita Nurhayati²⁾

^{1,2)}Dosen Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

³⁾Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126. Telp: 0271-634524.

Email: endahsafitri@staff.uns.ac.id

Abstract

Construction projects in Indonesia are increasing following economic developments. High-quality concrete is needed to withstand greater loads, while Self Compacting Concrete (SCC) is needed to increase efficiency in the process of working on a project because it can flow independently without the help of a vibrator. Adding pozzolanic admixtures can increase the durability and strength of concrete compared to ordinary portland cement. This study aims to determine the effect of the addition of 12.5% metakaolin and silica fume variations of 0%; 9%; 11%; 13%; and 15% by weight of binder to self-solidifying high strength concrete and its effect on concrete permeability. When the concrete is 28 days old, the permeability test is carried out with a pressure of 1 kg/cm² for 24 hours on the test object in the form of a cube with a length of 15 cm on each side. Referring to ACI 301-729 that the resulting concrete does not meet the requirements of a watertight concrete with a permeability coefficient value of 0%; 9%; 11%; 13%; and 15% respectively at 5.94×10^{-10} m/s; 5.16×10^{-10} m/s; 2.05×10^{-10} m/s; 2.80×10^{-10} m/s; 3.99×10^{-10} m/s.

Keywords: concrete permeability, high strength self-compacting concrete, metakaolin, pozzolan, silica fume.

Abstrak

Proyek konstruksi di Indonesia semakin meningkat mengikuti perkembangan ekonomi. Beton mutu tinggi dibutuhkan untuk menahan beban yang lebih besar, sedangkan beton memadat mandiri atau *Self Compacting Concrete* (SCC) dibutuhkan untuk meningkatkan efisiensi dalam proses pengerjaan sebuah proyek karena dapat mengalir secara mandiri tanpa bantuan alat penggetar. Penambahan bahan tambah (*admixtures*) *pozzolan* dapat meningkatkan ketahanan dan kekuatan beton jika dibandingkan dengan semen *portland* biasa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan metakaolin 12,5% dan variasi *silica fume* 0%; 9%; 11%; 13%; dan 15% dari berat binder terhadap beton mutu tinggi memadat mandiri dan pengaruhnya terhadap permeabilitas beton. Saat beton berumur 28 hari dilakukan pengujian permeabilitas dengan tekanan 1 kg/cm² selama 24 jam pada benda uji berupa kubus dengan panjang 15 cm di setiap sisinya. Mengacu pada ACI 301-729 bahwa beton yang dihasilkan tidak memenuhi sebagai beton kedap air dengan nilai koefisien permeabilitas pada kadar 0%; 9%; 11%; 13%; dan 15% berturut-turut sebesar $5,94 \times 10^{-10}$ m/s; $5,16 \times 10^{-10}$ m/s; $2,05 \times 10^{-10}$ m/s; $2,80 \times 10^{-10}$ m/s; $3,99 \times 10^{-10}$ m/s.

Kata Kunci : beton memadat mandiri mutu tinggi, metakaolin, permeabilitas beton, pozzolan, *silica fume*.

PENDAHULUAN

Proyek konstruksi di Indonesia terus berjalan dan semakin meningkat mengikuti perkembangan ekonomi. Inovasi dalam pembangunan diperlukan guna memenuhi tuntutan di lapangan, seperti kurangnya lahan pembangunan dan bertambahnya variasi desain struktur. Sedikitnya lahan yang tersedia di area perkotaan memungkinkan untuk melakukan pembangunan dengan lantai yang sangat tinggi. Sementara itu, perkembangan desain yang bervariasi memerlukan struktur yang dapat memenuhi permintaan tersebut dan mampu menunjang beban di atasnya. Dengan demikian, perkembangan teknologi beton akan membantu efisiensi pekerjaan konstruksi sehingga diperlukan kajian lebih lanjut untuk menilai kinerja beton.

Dalam SNI 2847-2013 disebutkan bahwa beton adalah kombinasi dari beberapa bahan penyusun berupa semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, air, dan maupun tanpa bahan tambah (*admixtures*). Beberapa faktor yang memengaruhi kualitas beton di antaranya adalah kualitas bahan, metode kerja, dan metode perawatannya. Inovasi beton dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan konstruksi termasuk di antaranya beton memadat mandiri mutu tinggi atau HSSCC (*High Strength Self Compacting Concrete*).

SNI 03-6486-2000 menyebutkan bahwa beton yang memiliki kuat tekan sebesar 41,4 MPa atau lebih dari itu digolongkan kedalam beton mutu tinggi. Seiring dengan peningkatan pembangunan dan perkembangan konstruksi masa kini, efektivitas lahan konstruksi semakin diperhatikan sehingga bangunan tinggi dipilih sebagai alternatif pembangunan. Beton mutu tinggi digunakan sebagai salah satu teknologi dalam pembangunan bangunan tinggi karena mampu menopang beban yang lebih berat pada bangunan tersebut.

Workabilitas yang tinggi dengan sifat *fluidity* atau kecairan yang tinggi pada beton memadat mandiri menyebabkan beton dapat mengalir secara mandiri dan secara mudah mengisi celah dalam cetakan tanpa bantuan alat. *Self Compacting Concrete* (SCC) merupakan salah satu inovasi beton yang bisa mengalir juga mengisi ruang kosong dengan mandiri dalam cetakan tanpa bantuan vibrator atau alat lainnya. Hal ini akan mempermudah pekerjaan beton, terutama pada struktur tulangan yang kompleks (EFNARC, 2005). Fluiditas atau kualitas cairan yang tinggi pada beton segar SCC membuat beton tersebut mampu mengalir dan memenuhi ruang kosong di cetakan dengan atau tanpa bantuan getaran (Okamura, H dan Ouchi M, 2003).

Bahan tambah penyusun beton dibutuhkan untuk mendapatkan kualitas beton yang baik sesuai dengan syarat yang telah ditetapkan. Penambahan bahan tambah (*admixtures*) *pozzolan* seperti abu sekam, metakaolin, *silica fume*, *fly ash* bertujuan untuk meningkatkan ketahanan dan kekuatan beton dengan menggantikan penggunaan semen *portland* biasa. Berdasarkan yang tertulis dalam ASTM C-125, arti dari *pozzolan* merupakan bahan yang mengandung silika atau silika alumina dengan sedikit atau tanpa sifat semen di dalamnya, namun jika bereaksi secara kimia dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dalam bentuk butiran dan keadaan lembap pada suhu biasa, dapat menghasilkan senyawa bersifat semen.

Mengacu pada penelitian sebelumnya, digunakan bahan tambah jenis mineral yaitu metakaolin dan *silica fume* yang dinilai efektif sebagai pengganti semen. Metakaolin dan *silica fume* sebagai *pozzolan* dapat berperan sama sebagai semen *portland* karena memiliki ukuran yang lebih kecil sehingga dapat mengisi rongga-rongga pada beton dan meningkatkan kepadatan beton. Metakaolin dapat menggantikan penggunaan semen karena mengandung SiO_2 dan Al_2O_3 yang termasuk dalam unsur utama penyusun semen (Sambowo, 2011). Berdasarkan ASTM C 1240-95, kandungan silikat (SiO_2) dalam *silica fume* melebihi 85% dan memiliki diameter 1/100 dari semen sehingga teksturnya yang sangat halus.

Sebayang (2011) pada penelitiannya menyebutkan bahwa kecacakan pada beton dapat berkurang dengan penambahan *silica fume* yang semakin besar. *Silica fume* optimum didapatkan pada kadar 9% dengan kuat tekan optimum mencapai 51,35 MPa saat umur 56 hari. Rashad (2019) dalam penelitiannya mendapatkan hasil kuat tekan beton optimum pada kadar metakaolin 12,5% dengan nilai sebesar 50,85 MPa. *Silica fume* memiliki partikel yang lebih halus dibandingkan dengan metakaolin sehingga *silica fume* dapat mengisi terlebih dahulu rongga antar semen kemudian mengisi rongga antar metakaolin sehingga mampu mengurangi porositas beton dan memperbaiki struktur mikro beton (Chu dkk., 2021).

Permeabilitas merupakan kemampuan beton untuk meloloskan benda asing di dalamnya. Pengujian permeabilitas dilakukan sebagai salah satu faktor yang akan berpengaruh pada durabilitas beton. Penggunaan *silica fume* sebagai bahan tambah dapat mengurangi nilai permeabilitas pada beton (Sutanto, dkk. 2020). Mengacu pada ACI 301-729 (revisi 1975) (dalam Neville dan Brooks, 1987), suatu beton normal dapat dikatakan sebagai beton kedap air apabila nilai rerata koefisien permeabilitas beton jika diuji dengan air tawar lebih kecil dari $1,5 \times 10^{-11}$ m/s.

METODE

Metode penelitian yang digunakan berupa metode eksperimental dengan parameter yang diuji berupa permeabilitas pada beton memadat mandiri mutu tinggi terhadap penambahan metakaolin 12,5% dan variasi *silica fume* sebagai pengganti berat binder. Variasi *silica fume* yang digunakan adalah 0%; 9%; 11%; 13%; dan 15%. Pengujian parameter beton segar SCC mengacu pada standar EFNARC 2005 yang terdiri dari *filling ability*, *passing ability*, dan *segregation resistance*. Pengujian permeabilitas beton menggunakan benda uji berupa kubus dengan panjang 15 cm setiap sisinya dan dilaksanakan ketika beton sudah berumur 28 hari kemudian diuji menggunakan alat uji permeabilitas berupa *Water Permeability Apparatus* dengan tekanan 1 kg/cm² selama 24 jam. Adapun benda uji pada penelitian ini tercantum dalam **Tabel 1**. berikut ini:

Mix Design

Mix design atau rancangan campuran beton pada pembuatan *High Strength Self Compacting Concrete* mengacu pada *European Federation of National Associations Representing for Concrete* (EFNARC) 2005. Secara garis besar, penelitian ini menggunakan faktor air semen (fas) sebesar 0,25, sedangkan kadar *superplasticizer* optimum yang digunakan sebesar 1,5% dari berat *binder*. Adapun rekapitulasi rancang campuran beton dicantumkan dalam Tabel 1. berikut:

Tabel 1. Hasil Perhitungan Rancang Campur Beton HSSCC

Benda Uji	Agg. Halus (Kg/m ³)	Agg. Kasar (Kg/m ³)	Semen (Kg/m ³)	Metakaolin (Kg/m ³)	Silica Fume (Kg/m ³)	SP (lt/m ³)	Air (lt/m ³)
HSSCC-SF0%-P	925,94	783,713	525,00	75,00	0,00	9,00	150,00
HSSCC-SF9%-P	916,25	775,511	471,00	75,00	54,00	9,00	150,00
HSSCC-SF11%-P	914,10	773,688	459,00	75,00	66,00	9,00	150,00
HSSCC-SF13%-P	911,94	771,865	447,00	75,00	78,00	9,00	150,00
HSSCC-SF15%-P	909,79	770,043	435,00	75,00	90,00	9,00	150,00

Permeabilitas Beton

Permeabilitas beton diartikan sebagai kemampuan pada beton untuk meloloskan cairan melewati pori-pori yang saling berikatan (Irma & Lubis, 2021). Ukuran butiran semen akan memengaruhi nilai permeabilitas, sehingga penggunaan diameter dari bahan pengisi yang lebih besar akan meningkatkan nilai permeabilitasnya. Air yang terjebak dalam campuran beton akan menguap selama pelaksanaan pekerjaan beton sehingga tercipta rongga di dalamnya.

Pengujian permeabilitas beton dilakukan pada benda uji kubus dengan panjang 15 cm di setiap sisinya. Sebelum pengujian dilaksanakan, benda uji berumur 28 hari yang telah melewati perawatan (*curing*), terlebih dahulu dikeringkan dalam waktu 24 jam menggunakan oven pada suhu ±100°C agar mencapai berat kering oven. Setelah itu, benda uji diuji menggunakan alat uji permeabilitas dengan tekanan air 1 kg/cm² dalam kurun waktu 24 jam.

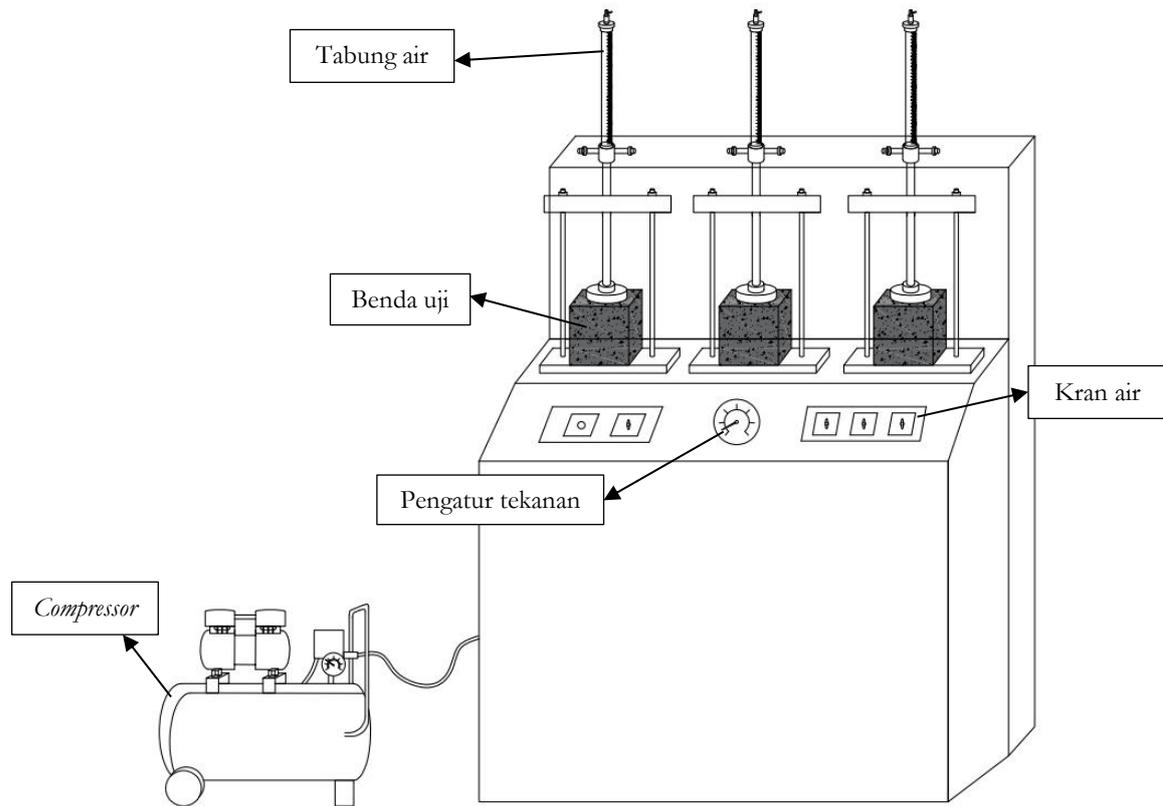
Nilai permeabilitas beton didapatkan dengan koefisien permeabilitas. Mengacu pada penelitian Khonado, M. F. (2019), koefisien permeabilitas untuk uji aliran dapat diperoleh berdasarkan Hukum Darcy dengan persamaan [1] sebagai berikut:

$$K = \frac{\rho g L Q}{PA} \dots\dots\dots [1]$$

keterangan:

- K = koefisien permeabilitas (cm/s)
- ρ = massa jenis air (kg/cm³)
- g = percepatan gravitasi (cm/s²)
- L = panjang atau tinggi sampel (cm)
- Q = debit aliran air (cm³/s)
- P = tekanan air (kg cm/s²/cm²)
- A = luas penampang sampel (cm²)

Pengujian permeabilitas beton menggunakan alat uji permeabilitas yang terdapat pada Laboratorium Bahan Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret berupa *Water Permeability Apparatus* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Set-up pengujian permeabilitas

Pengujian Beton Segar

Pengujian beton segar sebagai parameter SSC bertujuan untuk menentukan tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*) dengan beton masih dalam keadaan segar atau cair. Berdasarkan EFNARC 2005, pengujian beton segar parameter SCC yaitu *slump flow test*, *L-box test*, dan *V-funnel T_{5minute} test*. *Slump flow test* bertujuan supaya mengetahui parameter *filling ability*, sedangkan *L-box test* dilakukan untuk menentukan parameter *passing ability*, sementara *V-funnel test* bertujuan untuk menentukan parameter *segregation resistance*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Beton Segar

Hasil dari pengujian beton segar yang terdiri dari *slump flow test*, *L-box test*, dan *V-funnel test* disajikan dalam Tabel 2. hingga Tabel 4. sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Slump Flow Test*

Variasi	Pengujian <i>Slump Flow</i>							
	T _{500rerata} (detik)	Syarat	Ket.	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _{rerata} (mm)	Syarat	Ket.
0%	4,6		√	675	685	680		√
9%	4,5	2 – 5 detik EFNARC 2002	√	725	715	720	650 – 800 mm EFNARC 2002	√
11%	4,2		√	720	745	732,5		√
13%	3,9		√	735	750	742,5		√
15%	3,4		√	745	760	752,5		√

Keterangan √ = Memenuhi syarat

Tabel 3. Hasil Pengujian L-Box

Variasi	h2 (cm)	h1 (cm)	h2/h1	Syarat	Ket.
0%	8	10	0,80	$h_2/h_1=0,8-1$ EFNARC 2002	√
9%	9	10	0,90		√
11%	11	12	0,92		√
13%	10	10	1,00		√
15%	10	10	1,00		√

Tabel 4. Hasil Pengujian V-Funnel

Variasi	V-Funnel (detik)	Syarat	Ket.
0%	11	6 – 12 detik EFNARC 2002	√
9%	10,5		√
11%	9		√
13%	8,5		√
15%	7,5		√

Tabel 2. menunjukkan hasil pengujian *slump flow* dimana diameter pada uji *slump flow* semakin meningkat seiring dengan penambahan variasi *silica fume*. Pada penelitian ini, semakin besar diameter pada uji *slump flow* semakin berkurang waktu yang diperlukan untuk mencapai diameter 500 cm sehingga beton memadat mandiri mutu tinggi dengan bahan tambah metakaolin 12,5% memiliki *filling ability* yang semakin besar seiring dengan penambahan variasi *silica fume*. Sementara itu, pada Tabel 3. disajikan hasil dari pengujian L-Box dimana h2 merupakan tinggi beton segar pada pangkal L-box sedangkan h1 merupakan tinggi beton segar pada ujung alat L-box. Parameter *passing ability* pada uji L-Box didapatkan dari pembagian h2 dengan h1. Adapun Tabel 4. menyatakan hasil dari pengujian *v-funnel* berupa waktu yang dibutuhkan beton segar untuk dapat lolos dari alat *v-funnel*. Berdasarkan Tabel 2. hingga Tabel 4. dapat ditarik kesimpulan bahwa hasil dari ketiga pengujian tersebut memenuhi persyaratan parameter yang telah ditetapkan oleh EFNARC 2002. Dari data yang ditunjukkan pada masing-masing pengujian, membuktikan bahwa penambahan *silica fume* dapat meningkatkan *workability* beton memadat mandiri.

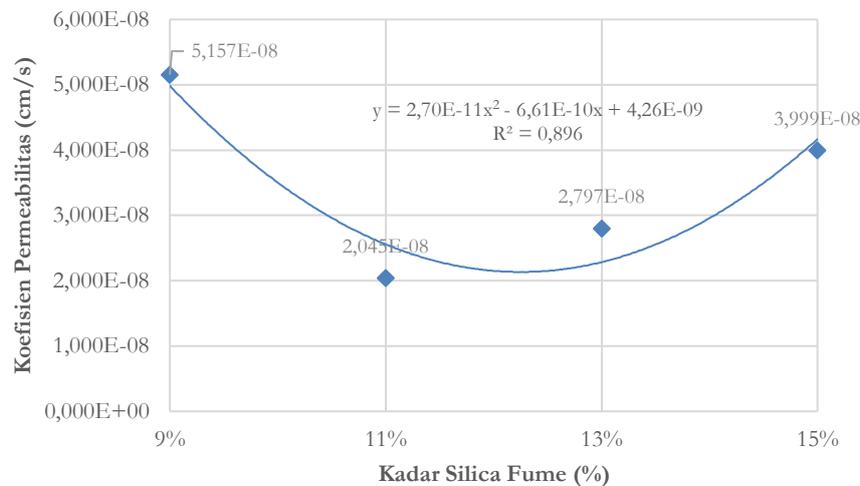
Hasil Pengujian Permeabilitas Beton

Hasil pengujian permeabilitas pada beton HSSCC dengan metakaolin 12,5% dan variasi *silica fume* pada tekanan 1 kg/cm² selama 24 jam tercantum dalam Tabel 5. berikut ini:

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Pengujian Permeabilitas Beton

Variasi	Volume Penurunan Air (cm ³)			Rata-Rata (cm ³)	Debit (cm ³ /s)	Koefisien Permeabilitas (m/s)
	Sampel A	Sampel B	Sampel C			
0%	158	154	150	154	8,91E-04	5,94E-10
SF9%	142	134	125	133,67	7,74E-04	5,16E-10
SF11%	55	54	50	53	3,07E-04	2,05E-10
SF13%	74,5	83,5	59,5	72,50	4,20E-04	2,80E-10
SF15%	102	98	111	103,67	5,60E-04	3,99E-10

Dari hasil perhitungan di atas, berdasarkan ACI 301-729 (revisi 1975) beton HSSCC pada seluruh kadar *silica fume* tidak memenuhi syarat sebagai beton kedap air karena nilai koefisien permeabilitas melebihi 1,5E-11 m/s. Berdasarkan Tabel 5. dapat dibuat grafik hubungan antara nilai koefisien permeabilitas beton dengan variasi penambahan komposisi *silica fume* yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Hubungan Nilai Koefisien Permeabilitas dengan Variasi Kadar *Silica Fume*

Dari hasil analisis yang disajikan dalam Tabel 5. dan grafik pada Gambar 2., menunjukkan bahwa penambahan *silica fume* sebagai pengganti binder dapat mengurangi permeabilitas pada beton HSSCC. Nilai permeabilitas terendah didapatkan pada kadar *silica fume* mencapai 11%. Penurunan nilai koefisien permeabilitas pada substitusi semen dengan *silica fume* 9%; 11%; 13%; dan 15% berturut-turut sebesar 13,20%; 65,58%; 52,92%; dan 32,68%. Berdasarkan persamaan regresi yang didapatkan dari grafik pada Gambar 2. dapat dihitung nilai optimum kadar *silica fume* untuk mendapatkan nilai koefisien permeabilitas yang optimal. Nilai optimum terjadi kadar *silica fume* 12,25% dengan koefisien permeabilitas sebesar $2,1343 \times 10^{-8}$ cm/s.

Permeabilitas beton berkurang seiring dengan meningkatnya nilai kuat tekan pada beton. Mengacu pada penelitian Sarwatatwadhika P. (2021), mengenai beton memadat mandiri mutu tinggi dengan metakaolin 12,5% dan variasi *silica fume* 0%; 9%; 11%; 13%; dan 15%, nilai kuat tekan beton meningkat mulai variasi *silica fume* 9% dan menurun mulai kadar 11% dengan nilai kuat tekan berturut-turut sebesar 41,99 MPa; 55,39 MPa; 67,75 MPa; 61,80 dan 58,03 MPa. Hal ini sebanding dengan hasil dari pengujian permeabilitas yang telah dilaksanakan dimana kuat tekan meningkat mulai variasi *silica fume* 9% dan nilai permeabilitas berkurang pada variasi tersebut kemudian diikuti mulai dari kadar 11% yaitu kuat tekan mengalami penurunan dan permeabilitas mengalami peningkatan.

Berdasarkan hasil pengujian di atas, permeabilitas beton dapat berkurang dengan semakin banyaknya penambahan *silica fume* pada beton. Berkurangnya permeabilitas atau bertambahnya impermeabilitas sebanding dengan meningkatnya durabilitas beton. Reaksi pozzolan yang timbul karena *silica fume* dan metakaolin mengikat Ca(OH)_2 menghasilkan C-S-H baru yang mampu menambah kekuatan tekan dan kerekatan antar agregat dalam beton melalui reaksi kimia sehingga pori-pori berkurang. Metakaolin dan *silica fume* memiliki diameter yang lebih kecil daripada semen sehingga berperan sebagai *filler effect* yang mengisi rongga kosong dalam campuran beton. Partikel yang sangat kecil pada metakaolin dan *silica fume* dapat mengisi ruang kosong sampai ke rongga paling kecil pada daerah paling lemah di antara agregat dan bahan pengikat yang berisi air dan Ca(OH)_2 .

Metakaolin dan *silica fume* berperan sebagai efek bantalan bola (*balling effect*) yang berfungsi sebagai agen pelumas di antara semua komponen beton, termasuk semen, pasir, dan kerikil. Komponen pada campuran beton yang berada di atas akan bergeser semakin ke bawah karena bantuan gravitasi. Perpindahan ini menyebabkan beton menjadi lebih padat dan meningkatkan impermeabilitas, yang berdampak pada peningkatan kekuatan pada beton tersebut.

KESIMPULAN

Dengan mengacu pada pengujian dan analisis data yang telah dijalankan beserta evaluasi terhadap data-data yang didapatkan mengenai kajian permeabilitas beton memadat mandiri mutu tinggi dengan metakaolin 12,5% dan variasi komposisi *silica fume* pada benda uji kubus 15 cm, berikut ini beberapa kesimpulan yang dapat diambil:

1. Berdasarkan standar yang mengacu pada EFNARC 2005 bahwa penambahan metakaolin 12,5% dan variasi silika fume 0%, 9%, 11%, 13%, dan 15% pada campuran beton memenuhi syarat parameter *filling ability*, *passing ability*, dan *segregation ability* sehingga beton tersebut termasuk dalam beton mutu tinggi memadat mandiri (*High Strength Self-Compacting Concrete*).
2. Permeabilitas beton berkurang dengan pemberian bahan tambah berupa metakaolin 12,5% dan variasi silika fume 0%; 9%; 11%; 13%; dan 15%. Berkurangnya permeabilitas beton terjadi saat penambahan kadar silika fume sebesar 9% dan 11% dengan koefisien permeabilitas sebesar $5,1569 \times 10^{-8}$ cm/s dan $2,0448 \times 10^{-8}$ cm/s serta penurunan terhadap beton kontrol sebesar 13,20% dan 65,58%. Kemudian permeabilitas beton mengalami kenaikan pada variasi 13% dan 15% dengan nilai koefisien permeabilitas sebesar $2,7971 \times 10^{-8}$ cm/s dan $3,9995 \times 10^{-8}$ cm/s diikuti dengan nilai penurunan sebesar 52,92% dan 32,68% terhadap beton kontrol. Nilai permeabilitas beton HSSCC mencapai nilai maksimumnya saat kadar silika fume sebesar 11% sedangkan nilai optimumnya terjadi pada kadar 12,25% dengan nilai koefisien permeabilitasnya mencapai $2,1343 \times 10^{-8}$ cm/s.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan syukur dan terima kasih atas tuntasnya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada kedua orang tua, dosen pembimbing, dan pihak yang tidak dapat di sebutkan satu per satu yang telah memotivasi penulis agar penelitian ini dapat selesai dengan baik.

REFERENSI

- American Concrete Institute. (1983). "ACI 301-729: *Specificatoin for Structural Concrete for Buildings*."
- American Concrete Institute. (1995). "ASTM C-1240: *Specification for Silica Fume for Use in Hydraulic-Cement Concrete and Mortar*."
- American Society for Testing and Material. (2020). "ASTM C-125 2020: *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*."
- Badan Standarisasi Nasional. (2000). "SNI 03-6486-2000 *Tata Cara Perencanaan Beton Berkekuatan Tinggi dengan Semen Portland Dan Abu Terbang*"
- Badan Standarisasi Nasional. (2013). "SNI 2847:2013: *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*."
- Chu, S. H., Chen, J. J., Li, L. G., Ng, P. L., & Kwan, A. K. H. (2021). Roles of packing density and slurry film thickness in synergistic effects of metakaolin and silika fume. *Powder Technology*, 387, 575–583.
<https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2021.04.029>
- EFNARC, 2005 "*Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*".
- Rashad, Huesca., 2019, *Kajian Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Komposisi Metakaolin dan Faktor Air Semen*. Universitas Negeri Sebelas Maret, Surakarta.
- Irma, T. T., & Lubis, Z., 2021, *Studi Eksperimen Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi pada Permeabilitas Beton*. *Ex-trapolasi*, Thesis, Universitas Islam Lamongan.
- Khonado, M. F., 2019, *Kuat Tekan dan Permeabilitas Beton Pours dengan Variasi Ukuran Agregat*, Jurnal Sipil Statik, Universitas Sam Ratulangi Manado.
- Okamura H. & Ouchi M. (2003). *Self Compacting Concrete*, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1 (1), 5 – 15.
- Safitri, K. W., Cahya, E. N., & Haribowo, R. (2021). Pengaruh Posisi Kemiringan Vertikal dan Horizontal terhadap Kemampuan Infiltrasi dan Permeabilitas Beton Porous dengan Recycled Aggregate. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 12(1), 30–37.
- Sambowo, A.K. (2001). "Engineering Properties and Durability Performance of Metacaolin and Metacaolin-PFA Concrete". Thesis. Faculty of Engineering at University of Sheffield, Sheffield.
- Sarwatawadhika P., Fernanda, 2021, *Kajian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas pada Beton Memadat Mandiri Mutu Tinggi dengan Metakaolin 12,5% dan Variasi Silika Fume*, Jurnal Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret.
- Sebayang, S., 2011, *Tinjauan Sifat-Sifat Mekanik Beton Alir Mutu Tinggi dengan Silika Fume sebagai Bahan Tambahan*, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UNILA, Lampung.
- Sutanto A., Kencana B., Sugiharto H., Kusuma J., 2020. *Pengaruh Penambahan Silika Fume dan Polypropylene Fiber terhadap Permeabilitas dan Kuat Tekan Beton*. Jurnal Dimensi, Universitas Petra.