

Kajian Penetrasi dan Permeabilitas Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri terhadap Variasi Komposisi Metakaolin dan Superplasticizer MasterEase 3029 Kadar 1,9% dari Berat Binder.

Wibowo¹⁾, Antonius Mediyanto²⁾, Silviana Valentin³⁾

¹⁾ Pengajar Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

²⁾ Pengajar Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

³⁾ Mahasiswa Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126; Telp. 0271-634524. Email: ValentinSilviana@gmail.com

Abstract

Infrastructure development in the world will never stop, because infrastructure is the economic driving force for every country, so research is increasing to get the highest quality concrete. This study discusses high strength self compacting concrete with variations composition of metakaolin. In this study metakaolin is used as a substitute for cement which has an effect on increasing the quality of concrete. The purpose of this study is to determine the optimal level of metakaolin to achieve high-quality concrete solids independently and meet the requirements of aggressive waterproof concrete. The method used in this study is experimental with the parameters studied are the penetration, permeability and workability of concrete. Cylindrical concrete with a diameter of 75 mm and a height of 15 mm. Concrete testing based on SNI 03-2914-1992, SNI 03-6468-2000, EFNARC 2000 and ACI 301-729. The results showed that all the concrete produced was of high strength concrete, with substitution of metakaolin at 17.5% can increase concrete compressive strength up to 27,5%, substitution of metakaolin at a level of 15% can reduce the value of penetration depth and the coefficient of permeability of the concrete by 36% and 93%. The fresh concrete test conducted to test the concrete fillingability is the slumpflow and V-funnel test, while the test for passingability is the L-box test.

Key words: High Strength Self Compacting Concrete, metakaolin, penetration, permeability, fillingability dan passingability.

Abstrak

Pembangunan infrastruktur di dunia tidak akan pernah berhenti, karena infrastruktur merupakan roda penggerak ekonomi bagi setiap negara. Sebagian infrastruktur menuntut kualitas beton mutu tinggi untuk mendukung ketahanan bangunan tersebut, perbaikan untuk mendukung hal ini adalah dengan ditambahkan pozzolan. Pozzolan yang digunakan dalam penelitian ini adalah metakaolin dengan kadar 12,5%; 15%; 17,5%; 20% dan 22,5%. Seiring berkembangnya inovasi beton, penggunaan beton memadat mandiri umum digunakan di kalangan pasar konstruksi. Pembuatan beton memadat mandiri membutuhkan membutuhkan FAS dan Superplasticizer yang tinggi, sehingga memungkinkan akan terbantu pori yang besar dan banyak. Pada bangunan air seperti basemen, tangki air, dinding penahan tanah dan bendungan dibutuhkan beton yang kedap air, karena masuknya air kedalam beton dapat menyebabkan korosi terhadap tulangan sehingga akan menurunkan masa layan beton. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kadar maksimum metakaolin untuk mencapai beton mutu tinggi memadat mandiri dan memenuhi persyaratan beton kedap air agresif, serta pengaruh metakaolin terhadap workabilitas beton. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimental dengan parameter yang dikaji adalah penetrasi, permeabilitas dan workability beton. Beton berbentuk silinder dengan diameter 75 mm dan tinggi 15 mm. Pengujian beton berdasarkan SNI 03-2914-1992, SNI 03-6468-2000, EFNARC 2000 dan ACI 301 – 729. Pengujian dilakukan dengan memberikan air yang bertekanan sebesar 1 kg/cm² selama 48 jam, 2 kg/cm² selama 24 jam dan 7 kg/cm² selama 48 jam. Hasil penelitian menunjukkan semua beton yang dihasilkan merupakan beton mutu tinggi. Substitusi metakaolin pada kadar 15% dapat menurunkan nilai kedalaman penetrasi dan koefisien permeabilitas beton berturut – turut sebesar 36% dan 93%. Pada pengujian beton segar, metakaolin menurunkan workability beton tetapi hasil pengujian pada beton segar masih memenuhi standar beton memadat mandiri yang ditetapkan oleh EFNARC 2000.

Kata kunci: beton mutu tinggi memadat mandiri, metakaolin, penetrasi, permeabilitas, fillingability dan passingability.

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di dunia tidak akan pernah berhenti, karena infrastruktur adalah roda penggerak ekonomi bagi setiap negara. Pada setiap pembangunan infrastruktur diperlukan kualitas mutu beton yang ditinggi, seperti untuk bangunan bertingkat, jalan raya, maupun bangunan air. Oleh karena itu dikembangkannya beton mutu tinggi untuk memenuhi tuntutan kebutuhan tersebut.

Self Compacting Concrete (SCC) adalah beton segar yang sangat plastis dan dapat mengalir karena berat sendirinya sehingga mampu mengisi seluruh cetakan tanpa adanya bantuan alat penggetar, dengan tetap bersifat homogen, kohesif, tidak segregasi dan tidak bleeding. Keuntungan yang diperoleh dari penggunaan beton SCC adalah mengurangi waktu kerja, jumlah pekerja, pemadatan dan penggetaran beton yang optimum, serta mengurangi polusi suara bagi lingkungan sekitar.

Durabilitas beton dapat dipengaruhi oleh proses atau dampak dari lingkungan sekitar (*eksternal*) dan antar bahan – bahan penyusun dengan bahan yang tercemar baik yang berasal dari dalam beton, ataupun pada permukaan beton (*internal*). Salah satu masalah yang timbul untuk struktur bangunan air adalah rembesan air yang dapat masuk ke

dalam beton. Rembesan tersebut dapat terjadi karena tegangan permukaan ataupun perbedaan tekanan air yang masuk ke dalam beton karena beton memiliki pori yang banyak dan saling berhubungan. Air yang masuk dapat menyebabkan korosi pada tulangan beton sehingga mengurangi keawetan beton dari masa layannya.

Metakolin berasal dari batuan kaolin yang telah dihaluskan dan melalui proses pemanasan pada suhu 450 – 900°C, berukuran 0,5 sampai 5 micron dan banyak mengandung SiO₂ dan Al₂O₃ yang merupakan unsur utama semen. Metakolin digunakan sebagai bahan tambah dimana senyawa silika yang berada di dalamnya akan bereaksi dengan CH hasil reaksi hidrasi semen dan membentuk senyawa CSH yang berperan sebagai pengikat. Dengan ukuran dan sifat metakolin tersebut diharapkan metakolin dapat mengisi rongga yang terdapat pada beton, memperkecil permeabilitas dan meningkatkan kepadatan beton sehingga dapat meningkatkan kualitas dan mutu beton.

Semakin banyak penggunaan metakolin akan menurunkan workabilitas beton segar. Hal ini disebabkan karena luas permukaan metakolin yang lebih besar dari pada semen. Salah satu pengupayaannya adalah dengan menambahkan *superplasticizer* dan penggunaan faktor air semen yang tepat. Faktor air semen yang digunakan juga akan mempengaruhi pori – pori beton dan *workability* beton segarnya. Semakin tinggi faktor air semen akan menyebabkan kuat tekan menurun, meningkatkan kedalaman penetrasi, permeabilitas semakin tinggi dan workabilitas beton meningkat. Hal ini dapat dipahami karena semakin banyak air tersisa yang tidak digunakan saat proses hidrasi semen akan memberikan pori – pori yang besar pada beton. Maka dari itu, diperlukan pengkajian yang lebih dalam lagi untuk menentukan kadar optimum penggunaan metakolin, serta proporsi dalam rancang campur beton untuk mendapatkan beton bermutu tinggi dan dapat memadat sendiri yang kedap air.

Beton mutu tinggi adalah suatu bahan yang dibuat dari campuran beton yaitu semen, agregat, air dan penambahan zat aditif sesuai dengan perbandingan yang sedemikian rupa sehingga campuran tersebut dapat membentuk beton yang bermutu tinggi. Menurut SNI 03-6468 – 2000 beton mutu tinggi merupakan beton yang memiliki kekuatan lebih besar sama dengan 41,4 MPa.

Beton dengan agregat normal, kekedapannya tergantung pada porositas pasta semen (A.M. Neville dan J. J. Brooks, 1987 : 264). Pasta semen yang mengeras merupakan struktur yang berpori (Kardiyono, 1996). Beton mempunyai kecenderungan berisi rongga akibat adanya gelembung – gelembung udara yang terbentuk lama atau setelah pencetakan (Murdock and Book, 1999) sehingga beton tidak dapat kedap air dengan sempurna.

Pozzolan adalah bahan alam atau buatan yang terdiri dari unsur-unsur silikat dan aluminar yang reaktif. *Pozzolan* sendiri tidak memiliki sifat semen, tetapi dalam partikel halus bereaksi dengan air dan kapur padam pada suhu normal (24-27°C) menjadi suatu partikel padat yang tidak larut dalam air (Tjoktrodimuljo, 2007).

Claudia (2018) dalam penelitiannya melakukan penambahan metakolin dengan variasi persentase 0%; 12,5%; 17,5%; 22,5%; dan 27,5% dari berat semen, menghasilkan kuat tekan berturut – turut 47,66 MPa ; 68,90 MPa ; 71,33 MPa ; 54,80 MPa ; 49,68 MPa dengan menggunakan faktor air semen sebesar 0,27 dari berat binder dan *superplasticizer* 1,7% dari berat binder.

M.Narmatha dan T.Felixkala (2016) dalam penelitiannya menyimpulkan setelah berumur 28 hari, kuat tekan beton dengan substitusi kadar metakolin sebesar 5% ; 10% dan 15% dari berat semen berturut – turut menaikan kuat tekan beton sebesar 4,36% ; 13,73% ; 17,45% dan turun pada kadar metakolin 20% sebesar 4,26%. Sehingga substitusi kadar metakolin sebesar 15% dari berat semen adalah kadar terbaik untuk menaikan kuat tekannya.

Ada 3 cara mekanisme transportasi air yang dapat beroperasi pada media semi- permeable seperti juga pada beton (Jackson dan Dhir, 1996), yaitu :

1. Absorpsi (penyerapan) adalah proses masuknya air/cairan melalui pori – pori atau kapiler yang terdapat pada beton. Aliran zat cair ini masuk disebabkan oleh tegangan permukaan.
2. Permeabilitas adalah proses masuknya cairan ke dalam beton karena adanya perbedaan tekanan baik cairan maupun gas. Contohnya terjadi pada bangunan penahan air, bendungan atau bangunan di dalam air.
3. Difusi terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi baik cairan, ion ataupun gas. Perbedaan konsentrasi bahan fluida membuat transport terjadi dari media tinggi ke media rendah.

Berdasarkan SNI 03-2914-1992, beton kedap air adalah beton yang tidak tembus air dan harus memenuhi ketentuan minimum untuk beton kedap air agresif, apabila diuji dengan cara tekanan air maka tembusnya air ke dalam beton tidak melampaui batas untuk agresif sedang tidak lebih dari 50 mm dan untuk agresif kuat tidak lebih dari 30 mm.

Beton yang baik adalah beton yang memiliki permeabilitas yang rendah. Akan tetapi menurut (Murdock 1979) beton tidak dapat kedap air secara sempurna. Terbentuknya rongga / pori pada beton terbentuk dari air yang digunakan untuk proses hidrasi semen. Semakin banyak digunakan air maka semakin tinggi pula permeabilitas beton. Oleh karena itu, dalam pembuatan beton kedap air disarankan supaya menggunakan faktor air semen yang rendah. Berdasarkan ACI 301-729 (revisi 1975) (dalam Neville dan Brooks, 1987) nilai koefisien permeabilitas maksimum pada beton disarankan 1,5.10⁻¹¹ m/s.

Berdasarkan EFNARC 2002 standar penelitian pengujian beton segar untuk karakteristik SCC yang memiliki parameter *fillingability* yang dilakukan dengan uji *slumpflow* dengan abrams cone dengan diameter rerata berada diantara 650 – 800 mm, dengan uji $T_{500\text{ mm}}$ *slumpflow* waktu alir berada diantara 2 detik sampai 5 detik, dengan uji *V-funnel* waktu alir harus berada diantara 6 detik sampai 12 detik. Sedangkan untuk pengujian parameter *passingability* dengan uji *L-Box* nilai perbandingan h_2 dengan h_1 harus berada diantara 0,8 – 1.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk mengkaji penetrasi, permeabilitas dan workabilitas (*filling ability dan passingability*) beton mutu tinggi memadat mandiri terhadap variasi komposisi metakaolin sebagai bahan pengganti semen. Penetrasi dan permeabilitas beton diuji pada umur beton 28 hari.

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah silinder berdiameter 75 mm dan tinggi 150 mm sebanyak 18 silinder. Material yang digunakan adalah air, semen tipe 1, pasir, keruil, *superplasticizer* dan metakaolin. Alat yang digunakan adalah satu set timbangan, *mix concrete*, oven, pipa pvc untuk cetakan beton, kerucut abrams, papan alir dan *V-funnel* untuk pengujian *fillingability*, *L- box* untuk pengujian *passingability*, dua set alat yang terdapat pada Laboratorium Bahan Universitas Sebelas Maret untuk pengujian kedalaman penetrasi dan permeabilitas beton terdapat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2** dan *Universal Testing Machine* untuk membelah beton.

Pengujian bahan penyusun beton yang dilakukan untuk pengujian pasir adalah uji kadar lumpur, *specific gravity*, pengujian kandungan organik dan gradasi agregat halus. Sedangkan pengujian pada kerikil meliputi uji gradasi agregat kasar, abrasi atau keausan dan *spesific gravity*.

Metakaolin yang digunakan berasal dari batuan kaolin yang dihaluskan berasal dari desa Semin, Gunung Kidul, Yogyakarta yang kemudian dibakar pada suhu 700 derajat celsius selama 7 jam di Fakultas Seni Rupa dan Desain Universitas Sebelas Maret.

Penelitian ini merancang *mix desain* yang mengacu pada EFNARC 2005, SNI 03-2914-1992, SNI 03-6468-2000 dan penelitian sebelumnya Claudia Hidayat 2018 dan M.Narmatha dan T.Felixkala 2018 untuk mencapai beton mutu tinggi memadat mandiri yang kedap air.

Faktor air semen yang digunakan adalah 0,31 dengan *superplasticizer* BASF MasterEase 3029 sebanyak 1,9% dari berat semen. Metakaolin yang disubstitusikan sebesar 12,5%; 15%; 17,5%; 20% dan 22,5% serta beton 0% sebagai beton pembanding. Rekapitulasi *mix design* beton dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Rekapitulasi *Mix Desain* Beton

Benda Uji	Agg Halus (kg/m ³)	Agg. Kasar (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Metakaolin (kg/m ³)	Superplasticizer (kg/m ³)	Air (kg/m ³)
HSSCC MK-0%	821,98	802,67	600,00	0	11,40	186,00
HSSCC MK-12,5%	815,96	796,80	525,00	75,00	11,40	186,00
HSSCC MK-15%	814,76	795,62	510,00	90,00	11,40	186,00
HSSCC MK-17,5%	813,55	794,45	495,00	105,00	11,40	186,00
HSSCC MK-20%	813,28	793,27	480,00	120,00	11,40	186,00
HSSCC MK-22,5%	812,07	792,09	465,00	135,00	11,40	186,00



Gambar 1 Alat Uji Kedalaman Penetrasi Beton



Gambar 2 Alat Uji Permeabilitas Beton

Cetakan dilepas setelah 48 jam kemudian benda uji dicuring selama 21 hari. Setelah 21 hari benda uji diangin – anginkan sebelum diuji pada umur 28 hari. Setelah berumur 28 hari dan reaksi hidrasi semen selesai benda uji dikeringkan untuk mencapai berat kering oven pada suhu 100°C selama 24 jam. Dilanjutkan dengan memasang selang air bertekanan pada permukaan atas benda uji dengan cara memberi lubang sebesar pipa selangnya. Pipa selang yang berisi air di – sealed dan diklem pada atas permukaan beton. Benda uji yang telah terpasang diberi air dengan tekanan 1 kg/cm² selama 48 jam, 3 kg/cm² selama 24 jam, 7 kg/cm² selama 24 jam.

Dalam penelitian ini untuk memperoleh nilai koefisien permeabilitas beton dilakukan uji penurunan air pada pipa transparan yang didiamkan selama 1 jam untuk mengetahui penurunan air. Selanjutnya membelah beton dengan universal testing machine untuk mengukur kedalaman penetrasi beton. Nilai koefisien permeabilitas beton dapat dihitung dengan persamaan [1] berikut ini:

$$k = \left(\frac{1}{A}\right) \cdot \left(\frac{dQ}{dt}\right) \cdot \left(\frac{L}{\Delta H}\right) \dots\dots\dots [1]$$

Keterangan:

- $\frac{dQ}{dt}$ = Kecepatan aliran air
- L = Ketebalan penetrasi pada beton
- A = Luas penampang
- ΔH = Tinggi air jatuh
- K = Koefisien permeabilitas

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian, pasir yang digunakan memenuhi standar yang ditetapkan oleh ASTM dengan nilai kadar lumpur 4,5%, nilai *specific gravity in saturated dry condition* adalah 2,51 dan modulus kehalusan pasir sebesar 2,25. Sedangkan hasil uji agregat kasar juga telah memenuhi standar ASTM dengan nilai abrasi/keausan adalah 26,92%, modulus kehalusan kerikil 7,67 dan *specific gravity* 2,51. Metakaolin yang digunakan mengandung SiO₂ sebesar 65% dan Al₂O₃ sebesar 15,02% yang merupakan unsur utama pembentuk semen.

Beton yang direncanakan dalam penelitian ini adalah beton normal yang memiliki berat jenis diantara 2,2 kg/m³ sampai 2,5 kg/m³ berdasarkan SNI 03-2847-2000. Salah satu pengujian beton segar untuk memenuhi standar beton memadat mandiri yang telah ditetapkan oleh EFNARC 2000 adalah dengan pengujian *fillingability* meliputi uji *slump-flow* dan *V-funnel*, pengujian parameter *passingability* meliputi uji *L-box*. Hasil pengujian pada beton segar dapat dilihat pada **Tabel 2** berikut ini:

Tabel 2. Hasil Pengujian Parameter Beton Segar.

Benda Uji	Drerata (mm)	T _{500rerata} (detik)	V-funnel (detik)	L-Box (h2/h1)
HSSCC MK-0%	755	2,21	10,31	0,947
HSSCC MK-12,5%	750	2,53	10,51	0,944
HSSCC MK-15%	742,5	2,73	11,27	0,944
HSSCC MK-17,5%	740	2,89	12	0,941
HSSCC MK-20%	735	3,14	12,26	0,842
HSSCC MK-22,5%	715	3,47	14	0,842

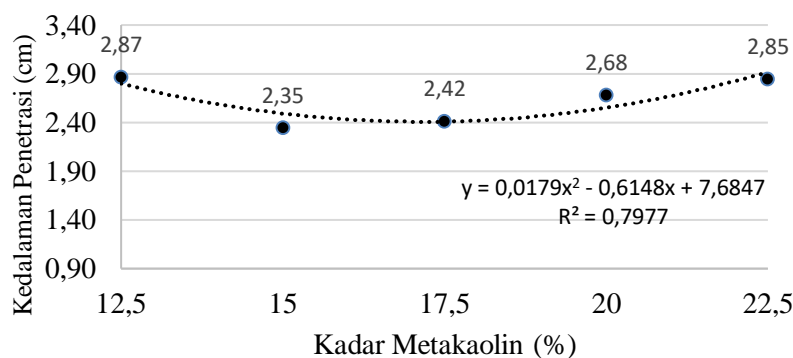
Tabel 2 menunjukkan semua hasil pengujian beton segar memenuhi standar EFNARC 2000. Pada pengujian *slumpflow*, semua nilai diameter rerata masih berada pada nilai antara 650 – 800 mm dan waktu alir untuk menyentuh diameter sebaran 500 mm masih berada antara 2 – 5 detik. Semua kadar memiliki nilai perbandingan h₂ dengan h₁ pada pengujian *L-box* masih bernilai diantara 0,8 – 1 yang berarti beton tersebut masih memenuhi persyaratan beton memadat mandiri berdasarkan pengujian *slumpflow* dan *L-box*. Pada pengujian *v-funnel* pada substitusi kadar 20% dan 22,5% waktu alir sudah melampaui 12 detik yang berarti beton segar sudah tidak memenuhi persyaratan beton memadat mandiri yang ditetapkan oleh EFNARC 2005 pada parameter *fillingability*.

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh pada **Tabel 2** dapat dilihat bahwa semakin tinggi kadar metakaolin yang ditambahkan akan membuat beton segar menjadi lebih kental dan menurunkan *workability* beton. Hal ini terjadi karena metakaolin bersifat seperti lempung yang lebih mudah untuk menyerap air dari pada semen.

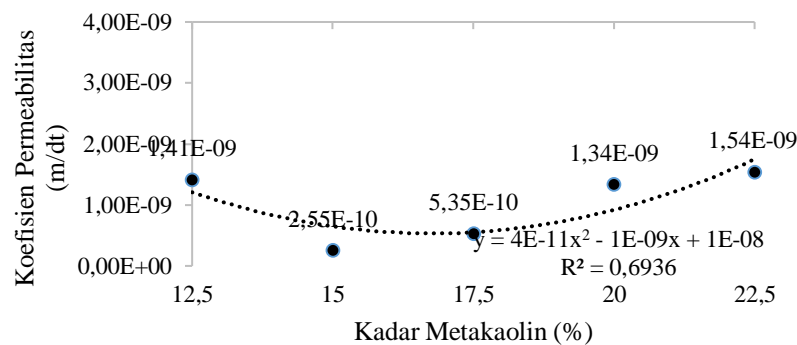
Pengujian beton kedap air dilakukan dengan pengujian penetrasi dan permeabilitas beton yang mengacu pada standar yang ditetapkan oleh SNI 03-2914-1992. Hasil penelitian pada uji penetrasi dan permeabilitas dapat dilihat pada **Tabel 3** berikut ini:

Tabel 3 Hasil Rerata Pengujian Penetrasi dan Permeabilitas Beton.

Benda Uji	Rerata Kedalaman Penetrasi (cm)	Permeabilitas Beton (m/dt)
HSSCC MK-0%	3,2	$3,691 \times 10^{-9}$
HSSCC MK-12,5%	2,86	$1,411 \times 10^{-9}$
HSSCC MK-15%	2,35	$2,549 \times 10^{-10}$
HSSCC MK-17,5%	2,42	$5,346 \times 10^{-10}$
HSSCC MK-20%	2,68	$1,335 \times 10^{-9}$
HSSCC MK-22,5%	2,85	$1,542 \times 10^{-9}$



Gambar 3 Grafik Hubungan Kedalaman Penetrasi dengan Variasi Komposisi Metakaolin



Gambar 4 Grafik Nilai Koefisien Permeabilitas Beton dengan Variasi Komposisi Metakaolin

Berdasarkan hasil penelitian pada **Tabel 3** di atas menunjukkan semua nilai penetrasi memenuhi syarat sebagai beton kedap air agresif yang ditetapkan oleh SNI 03-2914-1992 yaitu kedalaman penetrasi tidak lebih dari 30 mm untuk syarat agresif sedang dan tidak lebih dari 50 mm untuk syarat agresif kuat.

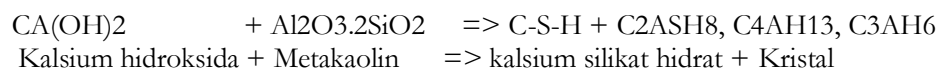
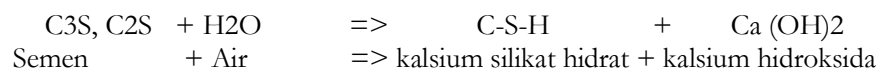
Berdasarkan hasil penelitian pada **Tabel 3** diperoleh nilai substitusi semen dengan metakaolin terbaik untuk menurunkan kedalaman penetrasi beton adalah pada 15%. Pada beton normal tanpa metakaolin kedalaman penetrasi mencapai hingga 3,2 cm. dimana dengan mensubstitusikan semen dengan metakaolin dengan kadar 12,5%; 15%; 17,5%; 20% dan 22,5% berturut - turut akan menurunkan kedalaman penetrasi sebesar 11,62%; 36,17%; 32,40%; 19,27% dan 12,28%. Berdasarkan penghitungan dengan persamaan regresi linear yang terdapat pada **Gambar 3** diperoleh kadar maksimum yang dapat digunakan untuk memperoleh nilai penetrasi terkecil adalah dengan mensubstitusikan semen dengan metakaolin sebesar 17,17%.

Berdasarkan hasil penelitian pada **Tabel 3** diperoleh nilai substitusi semen dengan metakaolin terbaik untuk menurunkan koefisien permeabilitas beton adalah pada 15%. Penghitungan dengan persamaan yang terdapat pada

grafik pada **Gambar 4** menunjukkan, kadar maksimum yang dapat digunakan untuk memperoleh koefisien permeabilitas terkecil adalah pada kadar 12,5%. Berdasarkan hasil penelitian yang terdapat pada **Tabel 3** menghasilkan beton normal tanpa metakaolin rerata koefisien permeabilitas beton adalah sebesar $3,691 \times 10^{-9}$ dimana dengan mensubstitusikan semen dengan metakaolin dengan kadar 12,5%; 15%; 17,5%; 20% dan 22,5% berturut-turut akan menurunkan koefisien permeabilitas beton sebesar 61,76%; 93,09%; 85,51%; 63,82% dan 58,21%.

Berdasarkan hukum Darcy koefisien permeabilitas dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah viskositas cairan yang semakin tinggi akan memiliki nilai koefisien permeabilitas yang semakin kecil, semakin kecil distribusi ukuran pori maka nilai koefisien permeabilitas akan semakin kecil, distribusi ukuran agregat yang semakin merata maka nilai koefisien permeabilitas akan semakin kecil, rasio kekosongan (*void*) yang semakin besar maka nilai koefisien permeabilitas akan semakin besar pula.

Tabel 3 diatas menunjukan semua koefisien permeabilitas tidak memenuhi syarat sebagai beton kedap air normal yang ditetapkan oleh ACI 301 – 729 yaitu lebih besar dari $1,5 \times 10^{-11}$ m/dt. Nilai permeabilitas yang tinggi disebabkan karena lebih banyaknya pori – pori yang saling berhubungan yang terkandung dalam beton. Dalam penelitian ini nilai yang dihasilkan pada uji permeabilitas sudah berbanding lurus dengan uji penetrasi. Metode yang dilakukan sudah sesuai dengan standar yang ditetapkan, tetapi akurasi alat uji yang terdapat pada Laboratorium Bahan Universitas Sebelas Maret Surakarta kurang mendukung untuk mendapatkan hasil yang lebih valid untuk memenuhi syarat yang ditetapkan oleh ACI 301 – 729.



Menurut Sanjay N. Patil, Anil K Gupta dan Subhash S.D (2011) reaksi pozzolanik pada metakaolin mengubah Ca(OH)_2 menjadi C-S-H tambahan yang dapat meningkatkan kekuatan tekan dan daya rekat antara agregat yang terkandung dalam beton melalui reaksi kimia. Metakaolin mengurangi ukuran pori-pori dalam pasta semen dan mengubah banyak partikel yang lebih halus menjadi pori-pori yang tidak bersambung, sehingga mengurangi permeabilitas beton secara substansial. Dari pernyataan tersebut dapat disimpulkan menurunnya nilai kedalaman penetrasi dan koefisien permeabilitas beton terjadi karena reaksi pozzolanik mengubah Ca(OH)_2 menjadi C-S-H yang mampu meningkatkan daya rekat yang besar antara agregat yang terkandung dalam beton. Daya rekat yang tinggi akan lebih mampu memampatkan antar rongga yang terdapat pada beton. Selain itu, senyawa C-S-H yang terjadi akibat penambahan metakaolin akan mampu mengisi rongga beton (*Filler Effect*). Kondisi rongga yang semakin mengecil atau zona interfasial yang semakin mengecil dan tertutupnya interkoneksi antara rongga atau zona interfasial, akan menyebabkan terjadi deperkolasi yang memutuskan hubungan antara pori dan zona interfasial. Jumlah pori yang tertutup semakin banyak maka akan semakin sedikit air yang dapat masuk dan terjebak didalam beton.

Penurunan nilai penetrasi dan koefisien permeabilitas pada kadar 20% dan 22,5% terjadi akibat penambahan metakaolin yang melebihi batas optimumnya sebagai pengganti sebagian berat semen. Terlalu banyak metakaolin yang digunakan dapat diartikan terjadi penurunan persentase semen sebagai pengikat utama dalam campuran beton, sehingga reaksi antara metakaolin dengan reaksi hidrasi semen belum terjadi secara optimal.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, pengolahan data, dan evaluasi yang telah dilakukan, kajian penetrasi dan permeabilitas beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi komposisi metakaolin dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penambahan variasi metakaolin menurunkan nilai kedalaman penetrasi dan koefisien permeabilitas beton. kadar optimum yang dapat digunakan untuk memperoleh nilai penetrasi terkecil adalah pada kadar 15%. Hasil nilai kedalaman penetrasi yang diperoleh dengan mensubstitusikan metakaolin akan menghasilkan beton yang memenuhi syarat beton kedap air yang ditetapkan oleh SNI 03-2914-1992 yaitu kedalaman penetrasi tidak lebih dari 30 mm untuk syarat agresif sedang dan tidak lebih dari 50 mm untuk syarat agresif kuat.
2. Semua koefisien permeabilitas tidak memenuhi syarat sebagai beton kedap air normal yang ditetapkan oleh ACI 301 – 729 yaitu lebih besar dari $1,5 \times 10^{-11}$ m/dt. kadar optimum yang dapat digunakan untuk memperoleh koefisien permeabilitas terkecil adalah pada kadar 15%.
3. Penambahan variasi metakaolin pada campuran beton mutu tinggi memadat mandiri menurunkan *workability* beton pada pengujian *Slumpflow*, *V-funnel* dan *L-box* seiring dengan bertambahnya metakaolin yang disubstitusikan, tetapi dalam penelitian ini semua pada semua penambahan metakaolin masih memenuhi syarat beton memadat mandiri yang ditetapkan oleh EFNARC 2000.

REKOMENDASI

1. Untuk mencapai tujuan penelitian yang diharapkan, penelitian selanjutnya disarankan membuat benda uji lebih dari yang diperlukan sehingga hasil yang didapatkan lebih akurat.
2. Perlu adanya pengawasan yang ketat pada saat pemasangan alat uji penetrasi dan permeabilitas beton untuk menghindari terjadinya kebocoran pada alat sehingga air bertekanan tetap konstan.

REFERENSI

- Anonim.1983. ACI 301-729 *Specifications for Structural Concrete for Buildings*.
- Anonim. 1992. *SNI 03-2914-1992 Spesifikasi Beton Bertulang Kedap Air*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Anonim. 2000. *SNI 03-6468-2000 Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi Dengan Semen Portland Dengan Abu Terbang*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Anonim. 2002 . *EFNARC 2002 Specification and Guidelines For Self-Compacting Concrete*.
- Anonim. 2005. *EFNARC. 2005 Specification and Guidelines For Self-Compacting Concrete*.
- Hidayat, Claudia. 2018. *Kajian Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Komposisi Metakaolin dan Faktor Air Semen*. Universitas Negeri Sebelas Maret, Surakarta.
- Neville, A.M. 1987. *Concrete Technology*. Longman Scientific Technical, New York.
- Namartha, et al. 2016. *Metakaolin – The Best Material for Replacement of Cement in Concrete*. IOSR-JMCE, India.
- Patil, S.N., Gupta,A.K., Deshpande, S., 2016, *Metakaolin – Pozzolanic Material For Cement in High Strength Concrete*, IOSR-JMCE, India.