

## KAJIAN KARBONASI PADA BETON MUTU TINGGI MEMADAT MANDIRI DENGAN VARIASI KOMPOSISI METAKAOLIN

Wibowo<sup>1</sup>, Endah Safitri<sup>2</sup> dan Delista Putri Deni<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta

Email: wibowotsipil87@gmail.com

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta

Email: safitri47@gmail.com

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta

Email: delistaputri27@gmail.com

### ABSTRACT

*The construction industry is an important thing to support the development of a country. In concrete construction, quality, strength, and durability of concrete are the main requirements of all. In urban tropical countries, carbonation is one of the essential factors that affect the durability of concrete, and it may cause corrosion of reinforced steel in concrete. Therefore, high strength self-compacting concrete may be expected as the solution, improved by pozzolanic additions, metakaolin with substitution dosage at 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; and 20%. This study purposed to determine the effect of metakaolin and its optimum dosage to improve high strength self-compacting concrete quality on its carbonation rates. This study was done by using experimental methods. It needs a plain cylindrical concrete with 75 mm diameter and 150 mm height, and testing by SNI 03-6468-2000, EFNARC 2002, and SEM-PUPR 25-2015. The carbonation test is done using accelerated laboratory carbonation in Structures and Materials Laboratory, Faculty of Engineering, Universitas Sebelas Maret by soaking the specimens in a 4% carbonate solution for 15 days, 37 days, and 51 days, proceeded by splitting using CTM, and spray it using a 1% phenolphthalein indicator to determine its carbonation depth. Based on the results, metakaolin might improve concrete quality by reducing its carbonation rates by 15% substitution dosage of cement content, with a nominal atmospheric carbonation coefficient 3,71 mm/year<sup>1/2</sup>, reduced 44,41% from HSSCC without metakaolin substitution. Metakaolin addition might reduce fresh concrete's workability and fulfill self-compacting concrete requirements specified by EFNARC 2002.*

*Keywords: high strength self-compacting concrete, metakaolin, carbonation, carbonation coefficient*

### ABSTRAK

Industri konstruksi merupakan hal yang sangat penting untuk menunjang berkembangnya suatu negara. Dalam konstruksi beton, mutu, kekuatan, dan durabilitas beton merupakan syarat yang utama. Pada negara beriklim tropis, karbonasi merupakan faktor penting yang mempengaruhi durabilitas beton karena dapat menyebabkan korosi pada tulangan beton. Oleh karena itu, beton mutu tinggi memadat mandiri diharapkan dapat menjadi solusi, dengan penambahan pozzolan sebagai perbaikan, yaitu metakaolin dengan kadar substitusi 10%; 12,5%; 15%; 17,5 %; dan 20%. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan metakaolin dan kadar optimumnya untuk meningkatkan kualitas beton terhadap laju karbonasi beton. Metode yang digunakan adalah eksperimental. Benda uji yang digunakan adalah beton silinder dengan diameter 75 mm dan tinggi 150 mm. Pengujian beton didasarkan pada SNI 03-6468-2000, EFNARC 2002, dan SEM-PUPR No. 25 Tahun 2015. Pengujian karbonasi dilakukan dengan cara uji karbonasi laboratorium dipercepat di Laboratorium Struktur dan Bahan, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret dengan merendam benda uji ke dalam larutan karbonat 4% selama 15 hari, 37 hari, dan 51 hari untuk selanjutnya dibelah menggunakan CTM dan disemprot menggunakan indikator phenolphthalein 1%. Berdasarkan hasil penelitian, metakaolin dapat meningkatkan kualitas beton dengan menurunkan laju karbonasi beton dengan kadar substitusi 15% dari kadar semen, dengan koefisien karbonasi pada kondisi atmosfer normal 3,71 mm/tahun<sup>1/2</sup> dan penurunan laju 44,41% dari beton normal. Penambahan metakaolin akan menurunkan workabilitas beton segar, tetapi masih memenuhi syarat beton memadat mandiri yang ditetapkan oleh EFNARC 2002.

Kata kunci: beton mutu tinggi memadat mandiri, metakaolin, karbonasi, koefisien karbonasi

## 1. PENDAHULUAN

Dewasa ini, pembangunan infrastruktur terus mengalami perkembangan yang pesat. Hal ini pun berdampak pada pesatnya perkembangan industri konstruksi sebagai penunjang, dikarenakan adanya tuntutan hasil konstruksi yang lebih baik, lebih efisien, memiliki kinerja yang tinggi, dan dapat mengatasi segala kendala yang terjadi. Syarat utama dalam konstruksi bangunan pada dasarnya adalah mengenai kekuatan beton, keawetan, dan harga yang ekonomis. Oleh karena itu, dikembangkan beton mutu tinggi memadat mandiri dengan penggunaan bahan pozzolan sebagai solusi. Beton memadat mandiri atau biasa dikenal dengan *self-compacting concrete (SCC)* merupakan beton yang bersifat plastis, dapat mengalir dengan berat sendiri tanpa bantuan alat pemadat, sehingga akan mengurangi biaya penggunaan alat pemadat, mempersingkat waktu kerja, dan mengurangi jumlah tenaga kerja. Selain itu, beton mutu tinggi bersifat homogen, kohesif, dan tidak mengalami *bleeding* maupun segregasi. Mutu beton yang tinggi akan meningkatkan performa kinerja beton sehingga dapat bekerja dengan baik dan memiliki durabilitas yang lebih tinggi daripada beton konvensional.

Lingkungan yang agresif membawa dampak pada kerusakan beton karena di lingkungan ini banyak zat-zat kimia reaktif yang menyebabkan kerusakan pada beton. Contoh dari lingkungan yang memungkinkan adalah lingkungan beriklim tropis yang dapat meningkatkan agresivitas CO<sub>2</sub> yang apabila bereaksi dengan air dapat membentuk asam karbonik cair yang akan menurunkan pH beton, menyebabkan terjadinya karbonasi, dan mengakibatkan korosi pada beton. Untuk mengatasi hal ini, dapat dilakukan dengan mengganti sebagian semen dengan zat pozzolonik seperti metakaolin. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sanjay N. Patil, Anil K. Gupta, dan Subhash S. D. (2011), sebagai bahan pozzolan pengganti semen, metakaolin memiliki berbagai kelebihan yang dapat meningkatkan kualitas dan durabilitas beton dalam menghadapi lingkungan yang agresif. Selain itu, metakaolin merupakan material yang ramah lingkungan dan *sustainable*, karena pada proses produksinya metakaolin menghasilkan emisi gas CO<sub>2</sub> yang sangat kecil, jauh lebih kecil daripada emisi yang dikeluarkan pada produksi semen, sehingga dapat berkontribusi dalam mengurangi efek pemanasan global.

## 2. LANDASAN TEORI

Berdasarkan SNI 03-6468-2000, beton mutu tinggi didefinisikan sebagai beton yang memiliki kuat tekan yang disyaratkan pada benda uji 28 hari atau 56 hari adalah lebih besar sama dengan 41,4 MPa.

*Self-Compacting Concrete (SCC)* adalah beton yang dapat memadat sendiri dengan *slump* yang cukup tinggi. Dalam proses penempatan pada volume bekisting (*placing*) dan proses pematatannya (*compaction*), SCC tidak memerlukan penggetaran seperti beton pada umumnya. SCC memiliki *flowability* yang tinggi sehingga mampu mengalir karena beratnya sendiri, memenuhi bekisting, dan mencapai kepadatan tertingginya sendiri (EFNARC, 2005).

Metakaolin merupakan pozzolan yang terbentuk dari hasil pembakaran (kalsinasi) dari kaolin pada suhu 450<sup>o</sup>C-900<sup>o</sup>C yang mempunyai ukuran partikel lebih kecil dari *silica fume* dan banyak mengandung SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (pozzolan) yang merupakan unsur utama penyusun semen. Sehingga, metakaolin dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen. Metakaolin dapat mengurangi tingkat porositas beton, mempercepat proses hidrasi semen, lebih tahan terhadap serangan asam dan sulfat, serta meningkatkan kepadatan dan mengurangi permeabilitas beton (Sambowo, 2002).

Silviana Valentin (2019) dalam penelitiannya melakukan penambahan metakaolin pada campuran beton dengan variasi persentase 0%; 12,5%; 15%; 17,5%; 20%; dan 22,5% dari berat semen dan menghasilkan kuat tekan berturut-turut 46,798 MPa; 50,094 MPa; 51,601 MPa; 59,699 MPa; 51,977 MPa; dan 45,198 MPa dengan faktor air semen yang digunakan adalah sebesar 0,31 dari berat binder dan *superplasticizer* BASF MasterEase 3029 sebesar 1,9% dari berat binder. Dari penelitian tersebut, substitusi kadar metakaolin yang paling optimum untuk digunakan adalah sebesar 17,5% dari berat semen untuk menaikkan kuat tekannya.

Berdasarkan EFNARC 2002, persyaratan standar untuk beton memadat mandiri adalah memenuhi parameter *fillingability* yang dilakukan dengan uji *slump flow* menggunakan *abrams cone* dengan diameter rata-rata 650 – 800 mm, uji T<sub>500</sub> *slump flow* dengan waktu alir 2 – 5 detik, dan uji *V-funnel* dengan waktu alir 6 – 12 detik. Pengujian parameter *passingability* dilakukan dengan uji *L-box* dengan nilai h<sub>2</sub>/h<sub>1</sub> berkisar antara 0,8 – 1.

### 2.1. Karbonasi Beton

Karbonasi pada beton dapat terjadi apabila gas CO<sub>2</sub> larut dalam air dan membentuk H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, kemudian beraksi lagi dengan Ca(OH)<sub>2</sub> yang merupakan hasil reksi dari hidrasi semen dan membentuk CaCO<sub>3</sub>. Asam karbonik cair tersebut menyerang beton dan mengurangi alkalinitas beton. Dalam hal ini, derajat keasaman (pH) dari pori-pori air pada pasta semen keras akan menurun dan menyebabkan lapisan pelindung pada beton rusak. Sehingga, tulangan

baja terekspos dan terjadi korosi. Korosi pada tulangan baja tersebut dapat menyebabkan berkurangnya ikatan antara baja dengan beton dan menurunkan kualitas beton (B. Barry *et al*, 2004).

Dalam satu dekade terakhir, pengujian karbonasi pada beton menggunakan metode uji karbonasi laboratorium dipercepat distandarkan menggunakan CO<sub>2</sub> dengan konsentrasi 4%. Selain itu, beberapa pengujian dilakukan menggunakan konsentrasi CO<sub>2</sub> yang bervariasi antara 4-10%. Konsentrasi CO<sub>2</sub> yang rendah akan menghasilkan kedalaman karbonasi yang cukup tinggi, dan sebaliknya konsentrasi CO<sub>2</sub> yang terlalu tinggi akan menghasilkan kedalaman karbonasi yang rendah. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, beton bertulang menunjukkan laju karbonasi yang signifikan pada umur layan beton 20 tahun (Castro *et al*, 1999, Moreno *et al*, 2002). Laju karbonasi dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti tipe dan faktor air semen, tingkat porositas beton, serta tipe dan kadar zat pozzolan yang ditambahkan (Moreno *et al*, 1999). Selain itu, pada suatu area beriklim tropis, kondisi atmosfer dapat meningkatkan agresivitas CO<sub>2</sub> karena kelembaban udara dan temperatur yang tinggi (Veleva *et al*, 1998).

Proses transportasi CO<sub>2</sub> ke dalam beton melalui media air yang mengandung CO<sub>2</sub> adalah melalui difusi. Difusi adalah peristiwa mengalirnya suatu zat dalam pelarut dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah. CO<sub>2</sub> dalam larutan karbonat m% akan bereaksi dengan air dan membentuk asam karbonik cair yang menurunkan pH beton dan menyebabkan terjadinya karbonasi, sehingga durabilitas atau masa layan beton akan menurun (Warda Ashraf, 2016). Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan untuk mengetahui nilai koefisien karbonasi yang dapat dihitung dengan persamaan (1) sebagai berikut :

$$k = \frac{x}{t^{1/2}} \quad (1)$$

dengan :

k = koefisien karbonasi (mm/tahun<sup>1/2</sup>); x = kedalaman karbonasi (mm); t= waktu (tahun<sup>1/2</sup>).

Persamaan (1) menghasilkan koefisien karbonasi sebagai hasil dari uji karbonasi laboratorium dipercepat, yaitu pada konsentrasi CO<sub>2</sub> x%. Selanjutnya, koefisien karbonasi pada kondisi atmosfer normal (400 ppm atau 0,04% CO<sub>2</sub>) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2).

$$k_a = \frac{0,04\%}{m\%} \cdot k \quad (2)$$

dengan :

k<sub>a</sub> = koefisien karbonasi pada kondisi atmosfer normal (mm/tahun<sup>1/2</sup>); k = koefisien karbonasi hasil pengujian (mm/tahun<sup>1/2</sup>); 0,04% = konsentrasi CO<sub>2</sub> pada kondisi atmosfer normal (m%) = konsentrasi CO<sub>2</sub> yang digunakan pada pengujian.

Berdasarkan penelitian Ho dan Lewis (1987), pada kondisi atmosfer normal, dimana konsentrasi udara adalah 0,04% atau 400 ppm, kualitas beton dapat dikategorikan berdasarkan koefisien karbonasinya yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kategori Kualitas Beton Berdasarkan Koefisien Karbonasi Atmosfer Normal (Ho and Lewis, 1987)

Koefisien Karbonasi (mm/tahun <sup>1/2</sup> )	Kategori Kualitas Beton
< 3	Baik
3 – 6	Sedang
> 6	Buruk

### 3. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, digunakan metode penelitian eksperimental untuk melakukan kajian terhadap karbonasi dan workabilitas (*fillingability* dan *passingability*) beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi komposisi metakaolin sebagai bahan pozzolan pengganti semen. Uji karbonasi dilakukan pada beton umur 28 hari. Benda uji yang digunakan adalah beton silinder dengan diameter 75 mm dan tinggi 150 mm sebanyak 18 buah. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Struktur Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret Surakarta.

### 3. 1. Pengujian Bahan Penyusun Beton dan Perancangan *Mix Design*

Pengujian bahan penyusun beton untuk agregat halus adalah uji kadar lumpur, *specific gravity*, kandungan zat organik, dan gradasi agregat halus. Pengujian agregat kasar terdiri dari uji abrasi, *specific gravity*, dan gradasi agregat kasar. Pengujian kandungan metakaolin dilakukan menggunakan uji XRF yang dilakukan di Laboratorium MIPA Universitas Sebelas Maret Surakarta. Perancangan *mix design* mengacu pada EFNARC 2005, SNI 03-6468-2000, dan penelitian sebelumnya oleh Putri (2018), Silviana Valentin (2019), dan Shi Hui-sheng (2009).

Pada penelitian ini bahan-bahan yang digunakan untuk membuat campuran HSSCC dengan Variasi Komposisi Metakaolin antara lain:

1. Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini adalah maksimum 10 mm dan minimum 6,75 mm. Proporsi agregat kasar adalah 49% dari agregat keseluruhan.

2. Agregat halus

Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini memiliki ukuran maksimum lebih kecil dari 4,75 mm setelah diayak. Proporsi agregat halus sebesar 51% dari volume agregat keseluruhan.

3. Metakaolin yang digunakan berasal dari kaolin yang dihaluskan dan dibakar pada suhu 700° C selama 7 jam dengan volume substitusi terhadap semen sebesar 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20% dari berat binder.

4. Faktor air semen sebesar 0,31.

5. Bahan campur (*admixture*) yang digunakan adalah *superplasticizer* dengan merk dagang BASF MasterGlenium Sky 8851 dengan kadar 1,5% dari berat *binder*.

Rekapitulasi *mix design* beton secara lengkap ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi *Mix Design* beton Setiap 1 m<sup>3</sup>

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

### 3. 2. Pengujian Parameter Memadat Mandiri

Pengujian parameter memadat mandiri berdasarkan EFNARC 2002, menggunakan *abrams cone*, papan alir dan *V-funnel* untuk pengujian *fillingability*, serta *L-box* untuk pengujian *passingability*.

### 3. 3. Pengujian Karbonasi Beton

Pengujian beton dilakukan dengan cara uji karbonasi laboratorium dipercepat dengan merendam benda uji yang di-*seal* di bagian sampingnya ke dalam larutan karbonat 4% selama 15 hari, 37 hari, dan 51 hari untuk selanjutnya dibelah menggunakan CTM dan disemprot menggunakan indikator phenolphthalein 1% untuk mengetahui kedalaman karbonasinya (R. Neves, 2013), Hongzhi Cui (2015).

Berdasarkan Surat Edaran Menteri PUPR No. 25 Tahun 2015, indikator phenolphthalein 1% untuk pengujian karbonasi dibuat dengan mencampurkan 1 g phenolphthalein dengan 90 ml ethanol dan ditambahkan air suling hingga mencapai 100 ml. Hasil pengukuran dinyatakan hingga ketelitian 0,1 mm.

Media perendaman dan *Compression Testing Machine* dapat dilihat pada Gambar 1. dan Gambar 2.



Gambar 1. Media Pengujian Karbonasi



Gambar 2. *Compression Testing Machine*

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian, agregat halus yaitu pasir telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh ASTM dengan nilai *bulk specific gravity SSD* adalah 2,5867 gr/cm<sup>3</sup>, kandungan lumpur 4,00 %, dan modulus kehalusan 2,25. Agregat kasar yaitu kerikil juga telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh ASTM dengan nilai *bulk specific gravity SSD* sebesar 2,5742, abrasi 26,92%, dan modulus kehalusan 7,67. Metakaolin sebagai pozzolan memiliki kandungan SiO<sub>2</sub> sebesar 65,89 % dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 15,53% yang merupakan unsur utama pembentuk semen.

Beton yang direncanakan pada penelitian ini adalah beton normal yang menurut SNI 03-2847-2000 memiliki berat jenis antara 2,2 gr/cm<sup>3</sup> – 2,5 gr/cm<sup>3</sup>. Hasil pengujian beton segar yang dilakukan pada penelitian ini yaitu parameter *fillingability* dengan uji *slump flow* dan *V-funnel*, serta parameter *passingability* pada uji *L-box* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Beton Segar SCC

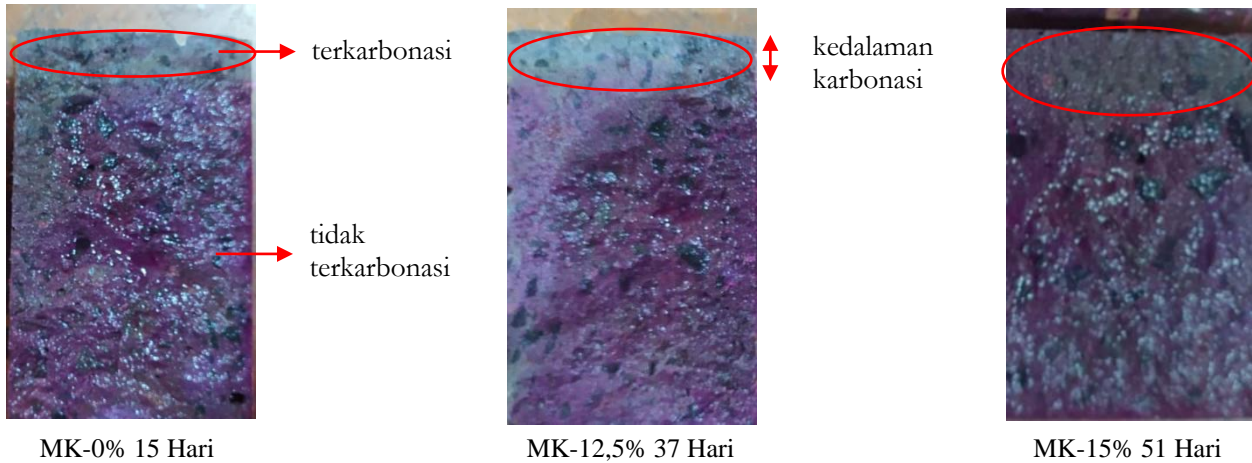
Nama Benda Uji	<i>Slump Flow</i>		<i>V-funnel</i>	<i>L-box</i>
	D <sub>rata-rata</sub> (mm)	T <sub>500rata-rata</sub> (detik)	Waktu Alir (detik)	h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> (mm)
HSSCC MK - 0%	755,0	3,11	10,38	0,951
HSSCC MK - 10%	742,5	3,47	10,45	0,938
HSSCC MK - 12,5%	732,5	3,58	11,03	0,938
HSSCC MK - 15%	727,5	4,23	11,31	0,888
HSSCC MK - 17,5%	717,5	4,44	11,57	0,886
HSSCC MK - 20%	705,0	4,50	12,24	0,872

Berdasarkan Tabel 3. di atas, hasil penelitian menunjukkan seluruh hasil pengujian beton segar pada uji *slump flow* dan *L-box* telah memenuhi persyaratan EFNARC 2002. Pada pengujian *slump flow*, seluruh diameter rata-rata berada pada nilai antara 650 – 800 mm dengan waktu alir diameter sebaran 500 mm berada di antara 2 – 5 detik. Pada pengujian *L-box*, perbandingan antara h<sub>2</sub> dan h<sub>1</sub> pada seluruh kadar substitusi metakaolin berada di antara 0,8 – 1. Akan tetapi, pada pengujian *V-funnel* dimana persyaratan waktu alir adalah 6 – 12 detik, kadar substitusi metakaolin 20% tidak memenuhi persyaratan waktu alir untuk beton mutu tinggi memadat mandiri menurut EFNARC 2002, dengan nilai waktu alir 12,24 detik.

Dari penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kadar substitusi metakaolin maka semakin kental pula campuran beton segar yang dihasilkan sehingga workabilitas beton semakin menurun. Hal tersebut dikarenakan sifat metakaolin yang seperti lempung, dimana metakaolin tersebut lebih mudah menyerap air daripada semen.

#### 4.1. Hasil Pengujian Karbonasi Beton

Pada pengujian karbonasi, penyemprotan indikator phenolphthalein 1% akan menimbulkan reaksi dan perubahan warna pada beton. Bagian beton yang terkarbonasi tidak akan mengalami perubahan warna sedangkan bagian yang tidak terkarbonasi akan berubah warna menjadi merah muda keunguan seperti yang terlihat pada Gambar 3.

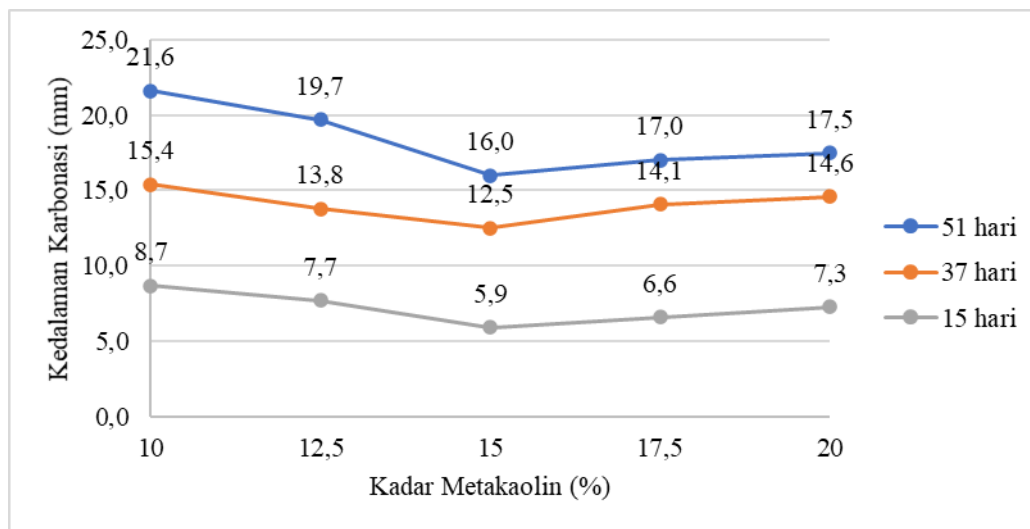


Gambar 3. Hasil Pengujian Karbonasi Beton

Hasil pengujian karbonasi pada konsentrasi karbondioksida 4% dengan variasi waktu 15 hari, 37 hari, dan 51 hari pada beton HSSCC dengan variasi komposisi metakaolin dapat dilihat pada Tabel 4. dan Gambar 4. di bawah ini.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kedalaman Karbonasi Beton

Nama Benda Uji	Kedalaman Karbonasi (mm)		
	A (15 hari)	B (37 hari)	C (51 hari)
Karbonasi MK - 0%	11,1	22,9	27,4
Karbonasi MK - 10%	8,7	15,4	21,6
Karbonasi MK - 12,5%	7,7	13,8	19,7
Karbonasi MK - 15%	5,9	12,5	16,0
Karbonasi MK - 17,5%	6,6	14,1	17,0
Karbonasi MK - 20%	7,3	14,6	17,5



Gambar 4. Grafik Hubungan Kedalaman Karbonasi dengan Variasi Komposisi Metakaolin



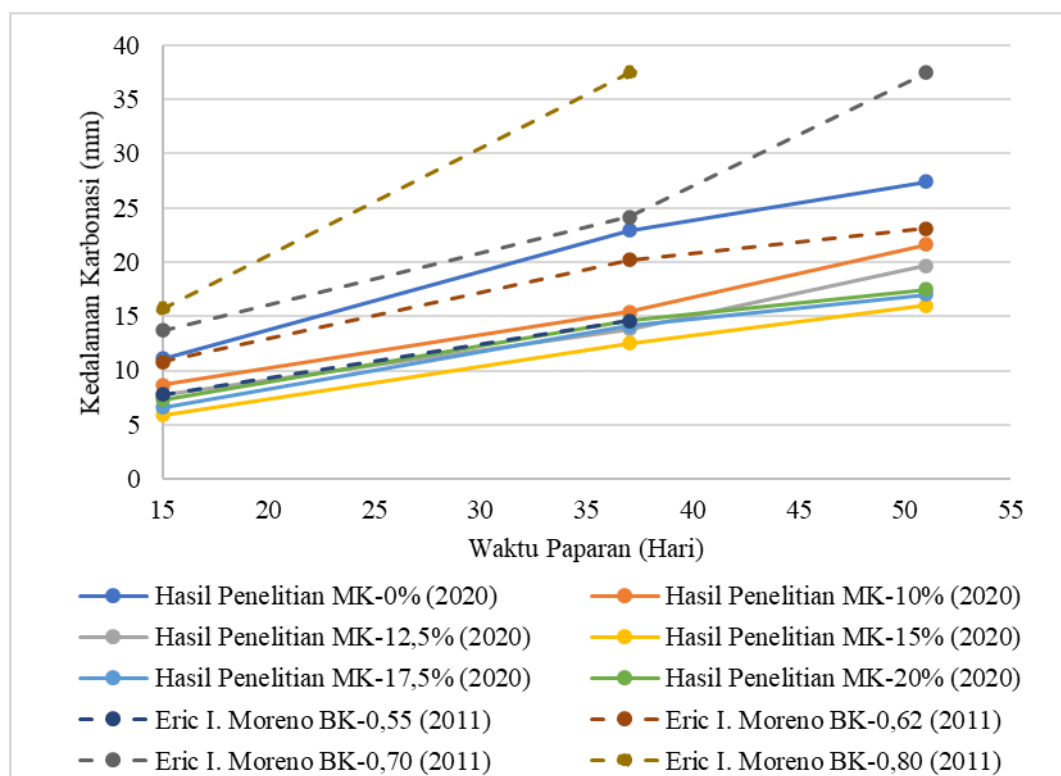
Berdasarkan Tabel 4. dan Gambar 4., dapat dilihat bahwa semakin lama waktu paparan beton terhadap CO<sub>2</sub> maka semakin tinggi kedalaman karbonasi beton. Pada ketiga variasi waktu tersebut, terjadi pola hasil penelitian yang sama, yaitu kedalaman karbonasi beton tertinggi terjadi pada beton normal tanpa substitusi metakaolin, kemudian terus mengalami penurunan berturut-turut pada kadar substitusi 10%; 12,5%; dan 15% dan mengalami peningkatan pada kadar substitusi 17,5% dan 20%.

Hasil pengujian tersebut kemudian dibandingkan dengan penelitian Eric I. Moreno, Romel Solis Carcano, dan Jorge Varela Rivera (2011), yang melakukan pengujian karbonasi terhadap beton dengan agregat batu kapur berdaya serap tinggi menggunakan 4 variasi faktor air semen yaitu 0,55; 0,62; 0,70; dan 0,80 dengan cara memaparkan benda uji ke dalam bilik karbonasi dengan konsentrasi CO<sub>2</sub> 4% dan kelembaban udara 60%. Data pengujian Eric I. Moreno dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Pengujian Karbonasi Beton Agregat Kapur (Eric I. Moreno, Carcano, Rivera, 2011)

Nama Benda Uji	Kedalaman Karbonasi (mm)		
	A (15 hari)	B (37 hari)	C (51 hari)
Karbonasi BK – 0,55	7,8	14,6	n.a.
Karbonasi BK – 0,62	10,8	20,2	23,1
Karbonasi BK – 0,70	13,7	24,2	37,5
Karbonasi BK – 0,80	15,7	37,5	n.a.

Dari hasil pengujian kedalaman karbonasi dan data pengujian karbonasi Eric I. Moreno, Romel Solis Carcano, dan Jorge Varela Rivera (2011), dapat dibuat grafik perbandingan kedalaman karbonasi beton yang disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Nilai Kedalaman Karbonasi Beton

Gambar 5. menunjukkan bahwa hasil pengujian karbonasi yang telah dilakukan menghasilkan *trend line* yang sama dengan penelitian Eric I. Moreno, Romel Solis Carcano, dan Jorge Varela Rivera (2011). Kedua metode pengujian yang dilakukan, baik dengan metode paparan terhadap larutan CO<sub>2</sub> 4% maupun metode paparan dalam bilik dengan konsentrasi CO<sub>2</sub> 4% memberikan pola hasil yang sama, yaitu kedalaman karbonasi mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu paparan dan penggunaan bahan tambah metakaolin dengan kadar tertentu dapat menurunkan kedalaman karbonasi yang terjadi. Beton dengan bahan tambah metakaolin menghasilkan kedalaman

karbonasi yang lebih rendah dibandingkan dengan beton normal maupun beton dengan agregat batu kapur, dimana beton dengan kadar substitusi metakaolin 15% menghasilkan kedalaman karbonasi paling rendah. Hal tersebut dikarenakan metakaolin merupakan pozzolan yang dapat meningkatkan daya rekat antar agregat yang terkandung dalam beton melalui reaksi kimia dan partikelnya yang kecil dapat mengisi rongga antar agregat, yang akan mengurangi tingkat porositas dan permeabilitas beton, sehingga dapat mengurangi kedalaman karbonasi yang terjadi pada beton (Edna Possan, 2017).

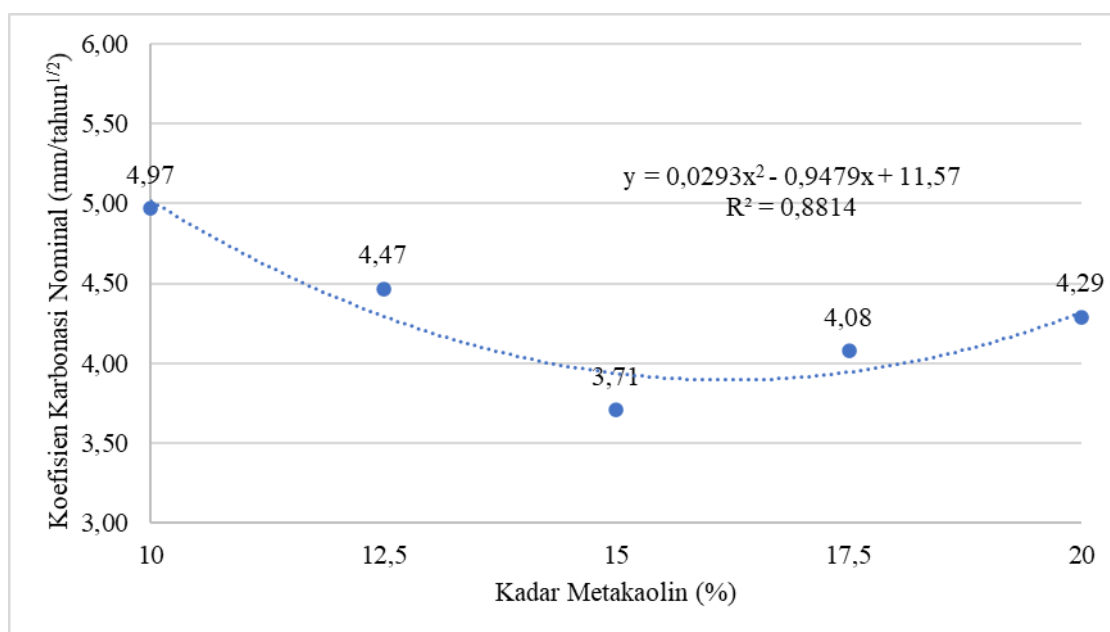
Laju karbonasi beton dapat ditentukan dari koefisien karbonasinya, yang diperoleh dari data kedalaman karbonasi dan waktu paparan. Dari data kedalaman karbonasi, ditentukan koefisien karbonasi beton menggunakan Persamaan 1 dan kemudian dikonversi menjadi koefisien karbonasi nominal, yaitu koefisien karbonasi pada kondisi atmosfer normal menggunakan Persamaan 2 yang dapat dilihat pada Tabel 6. dan Tabel 7. untuk selanjutnya disajikan grafik hubungan antara koefisien karbonasi dan variasi komposisi metakaolin pada Gambar 6.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Koefisien Karbonasi Beton (*Accelerated Laboratory Carbonation*)

Nama Benda Uji	Koefisien Karbonasi (mm/tahun <sup>1/2</sup> )			
	A (15 hari)	B (37 hari)	C (51 hari)	Rata-rata
Karbonasi MK - 0%	54,75	71,93	73,30	66,66
Karbonasi MK - 10%	42,92	48,37	57,78	49,69
Karbonasi MK - 12,5%	37,98	43,34	52,70	44,68
Karbonasi MK - 15%	29,10	39,26	42,80	37,06
Karbonasi MK - 17,5%	32,56	44,29	45,48	40,77
Karbonasi MK - 20%	36,01	45,86	46,82	42,89

Tabel 7. Hasil Perhitungan Koefisien Karbonasi Beton Nominal

Nama Benda Uji	Koefisien Karbonasi (mm/tahun <sup>1/2</sup> )	
	k <sub>4%CO2</sub>	k <sub>0,04%CO2</sub>
Karbonasi MK - 0%	66,66	6,67
Karbonasi MK - 10%	49,69	4,97
Karbonasi MK - 12,5%	44,68	4,47
Karbonasi MK - 15%	37,06	3,71
Karbonasi MK - 17,5%	40,77	4,08
Karbonasi MK - 20%	42,89	4,29



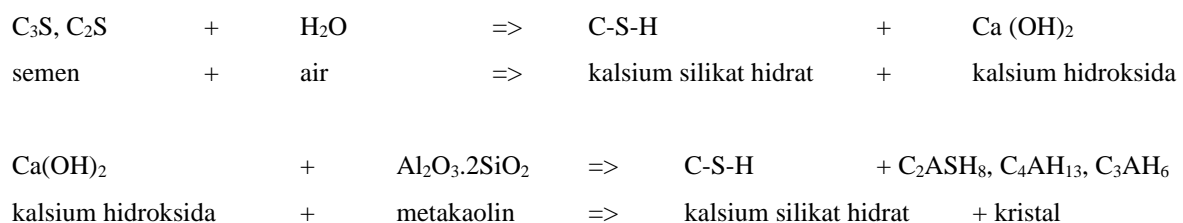
Gambar 6. Grafik Hubungan Koefisien Karbonasi Nominal dengan Variasi Komposisi Metakaolin



Berdasarkan Tabel 7. di atas, menunjukkan semua nilai koefisien karbonasi nominal pada kadar substitusi 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20% berkisar antara 3 mm/tahun<sup>1/2</sup> - 6 mm/tahun<sup>1/2</sup> yang berdasarkan **Tabel 1** dikategorikan sebagai beton dengan kualitas sedang. Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh nilai kadar substitusi metakaolin terbaik untuk menurunkan kedalaman karbonasi beton adalah 15%. Pada beton normal tanpa substitusi metakaolin, diperoleh koefisien karbonasi nominal sebesar 6,67 mm/tahun<sup>1/2</sup> yang berdasarkan kategori termasuk dalam beton berkualitas buruk. Kemudian, pada substitusi kadar 10% koefisien karbonasi nominal turun menjadi 4,97 mm/tahun<sup>1/2</sup>. Pada substitusi kadar 12,5% koefisien karbonasi nominal kembali turun menjadi 4,47 mm/tahun<sup>1/2</sup>. Pada substitusi kadar 15% koefisien karbonasi nominal turun menjadi 3,71 mm/tahun<sup>1/2</sup>, yang merupakan nilai terendah dari seluruh kadar substitusi. Pada substitusi kadar 17,5% koefisien karbonasi nominal mengalami sedikit peningkatan menjadi 4,08 mm/tahun<sup>1/2</sup>. Pada substitusi kadar 20% koefisien karbonasi nominal kembali meningkat menjadi 4,29 mm/tahun<sup>1/2</sup>. Substitusi metakaolin dengan kadar 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20% berturut-turut menurunkan koefisien karbonasi sebesar 25,46%; 32,98%; 44,41%; 38,83% dan 35,65% dari beton normal. Berdasarkan perhitungan dengan persamaan regresi linier pada Gambar 6. diperoleh kadar substitusi metakaolin optimum yang dapat digunakan untuk menurunkan laju karbonasi beton, yaitu sebesar 16,18%.

Karbonasi terjadi apabila CO<sub>2</sub> terpenetrasi ke dalam beton, larut dalam air dan membentuk asam karbonat, kemudian bereaksi dengan Ca(OH)<sub>2</sub> sebagai hasil dari hidrasi semen dan membentuk CaCO<sub>3</sub>. Berdasarkan penelitian ini, metakaolin sebagai pozzolan dapat menurunkan laju karbonasi pada beton karena reaksi pozzolanik pada metakaolin mengubah Ca(OH)<sub>2</sub> menjadi C-S-H tambahan yang dapat meningkatkan kekuatan dan daya rekat antara agregat yang terkandung dalam beton melalui reaksi kimia, sehingga akan mengurangi tingkat porositas dan permeabilitas beton. Reaksi pozzolanik metakaolin yang mengubah Ca(OH)<sub>2</sub> hasil hidrasi semen menjadi C-S-H menghasilkan beton yang lebih tahan terhadap serangan karbon, klorida, dan sulfat karena akan menghambat dan mengurangi reaksi Ca(OH)<sub>2</sub> dengan H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang merupakan hasil reaksi antara CO<sub>2</sub> dengan air, sehingga dapat mengurangi laju karbonasi yang terjadi.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sanjay N. Patil, Anil K. Gupta, dan Subhash S. D. (2011), pada penambahan metakaolin terjadi reaksi pozzolanik yang mengubah Ca(OH)<sub>2</sub> yang merupakan produk sampingan yang tidak diinginkan dari proses hidrasi semen menjadi C-S-H (sementitius) sebagai perekat tambahan yang dapat meningkatkan kuat tarik, kuat tekan, dan daya rekat antar agregat pada beton melalui reaksi kimia. Metakaolin akan memperkecil ukuran pori dalam pasta semen dan mengubah banyak partikel halus menjadi pori-pori yang tidak kontinyu, sehingga dapat mengurangi permeabilitas beton secara substansial. Reaksi pozzolanik metakaolin adalah sebagai berikut :



Penambahan metakaolin berfungsi sebagai penutup rongga karena menghasilkan senyawa C-S-H yang akan mengisi pori-pori halus (*filler effect*) dalam pasta semen dan peningkatan daya rekat yang terjadi akan mengurangi tingkat porositas beton dan meningkatkan kepadatan beton. Semakin kecil rongga yang terbentuk dan tertutupnya interkoneksi antar rongga akan mengakibatkan terjadinya deperkolasi yang dapat memutus hubungan antara pori dengan zona interfasi, sehingga memperkecil tingkat penyerapan beton terhadap zat cair maupun gas.

Penambahan metakaolin sebagai substitusi semen yang melebihi batas optimumnya akan mengakibatkan terjadinya penurunan kualitas beton. Hal tersebut dikarenakan metakaolin yang terlalu banyak disubstitusikan akan mengurangi prosentase semen sebagai bahan pengikat utama dalam campuran beton, sehingga reaksi hidrasi semen dan metakaolin belum terjadi secara optimal.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian serta analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan, maka pada kajian karbonasi pada beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi komposisi metakaolin dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan variasi metakaolin sebagai pozzolan pengganti semen yang tidak melebihi batas optimumnya dapat menurunkan laju karbonasi beton. Pada beton normal tanpa metakaolin koefisien karbonasi nominal mencapai 6,67 mm/tahun<sup>1/2</sup>, dimana dengan mensubstitusikan semen dengan metakaolin dengan kadar 10%; 12,5%; 15%; 17,5%; dan 20% berturut-turut akan menurunkan koefisien karbonasi nominal sebesar 25,46%; 32,98%;

44,41%; 38,83% dan 35,65% dari beton normal. Koefisien karbonasi terendah terjadi pada kadar substitusi metakaolin 15% dengan koefisien karbonasi nominal sebesar 3,71 mm/tahun<sup>1/2</sup>.

2. Penambahan variasi metakaolin sebagai pozzolan pengganti semen pada campuran beton mutu tinggi memadat mandiri menyebabkan workabilitas beton menurun pada pengujian *slump flow*, *V-funnel*, dan *L-box* seiring dengan semakin tingginya kadar metakaolin yang disubstitusikan karena metakaolin yang bersifat seperti lempung membuat campuran semakin kental. Akan tetapi, dalam penelitian ini, pada semua kadar substitusi metakaolin masih memenuhi syarat beton memadat mandiri berdasarkan EFNARC 2002.

## DAFTAR PUSTAKA

- 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*.
- Anonim. (2015). *Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.No. 25 Tahun 2015 Pedoman Metode Uji Pengukuran Kedalaman Karbonasi Beton Keras*. Kementerian PUPR, Jakarta.
- B. Bary (2004), *Coupled moisture—carbon dioxide—calcium transfer model for carbonation of concrete*, Cement and Concrete Research 34, pp 1859–1872.
- D.C. Park, (2008), *Carbonation of concrete in relation to CO<sub>2</sub> permeability and degradation of coatings*, Construction and Building Materials 22, pp. 2260–2268. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.032
- Edna Possan, (2017), *CO<sub>2</sub> uptake potential due to concrete carbonation: A case study*, Case Studies in Construction Materials 6, pp. 147–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.007>
- Ekolu, S.O. (2016). *A Review on Effects of Curing, Sheltering, and CO<sub>2</sub> Concentration Upon Natural Carbonation of Concrete*. University of Johannesburg, Afrika Selatan.
- Ho, D.W., Lewis R.K. (1987). *The Water Sorptivity of Concretes: The Influences of Constituents Under Curing*. Durability of Building Materials, 241-252.
- Hongzhi Cui (2015), *Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms*, Construction and Building Materials 93 pp. 522–527, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.007>
- Huet B., (2011), *A review of Portland cement carbonation mechanisms in CO<sub>2</sub> rich environment*, Energy Procedia 4, pp. 5275–5282. doi:10.1016/j.egypro.2011.02.507
- In-Seok Yoon, (2007), *Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete*, Atmospheric Environment 41, pp. 7274–7285. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.05.028
- Isabel Galan, (2013), *Natural and accelerated CO<sub>2</sub> binding kinetics in cement paste at different relative humidities*, Cement and Concrete Research 49, pp. 21–28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.009>
- L. A. Indriyanto (2020), *Pengaruh Penambahan Air Laut pada Masa Perawatan terhadap Infiltrasi Ion Klorida pada Beton dengan Penambahan Fly Ash 12.5%*, Jurnal Riset Rekayasa Sipil Universitas Sebelas Maret, Vol. 3 No. 2, Maret 2020, pp 61-67
- Moreno, E.I., Sagues, A.A. (1998). *Carbonation-induced Corrosion on Blended-Cement Concrete Mix Designs for Highway Structures*, CORROSION/1998 Paper No. 636. NACE International, Houston, TX.
- Moreno, E.I. (1999). *Carbonation of Blended Cement Concretes*. Ph.D. Dissertation, University of South Florida.
- Moreno, E.I., Castro, P., Leal-Murguía J. (2002). *Carbonation-induced Corrosion of Urban Concrete Buildings in Yucatan, Mexico*, CORROSION/2002 Paper No. 220. NACE International, Houston, TX.
- Namartha, et al. (2016). *Metakaolin – The Best Material for Replacement of Cemenr in Concrete*. IOSR-JMCE, India.
- Neville, A.M. (1987). *Concrete Technology*. Longman Scientific Technical, New York.
- Papadakis, (1991), *Experimental investigation and Mathematical Modeling of The Concrete Carbonation Problem*, Chemical Engineering Science Vol. 46, No. 5/6, pp. 1333-1338

- Patil, S.N., Gupta, A.K., Deshpande, S. (2016). *Metakaolin – Pozzolanic Material for Cement in High Strength Concrete*, IOSR-JMCE, India.
- R. Neves (2013), *Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance*, *Cement & Concrete Composites* 41, pp 9–15, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.006>
- Shi Hui-sheng, (2009), *Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete*, *Construction and Building Materials* 23, pp. 1980–1985. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.021
- Valentin, S. (2019). *Kajian Serapan dan Penetrasi pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri dengan Variasi Komposisi Metakaolin*. Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Warda Ashraf, (2016), *Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities*, *Construction and Building Materials* 120, pp. 558–570. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080>
- Xin Ruan, (2011), *Mesosopic simulation method of concrete carbonation process*, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 99–110. <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2011.605370>