

KAJIAN SERAPAN CO₂ DAN KARBONASI PADA BETON MUTU TINGGI MEMADAT MANDIRI DENGAN METAKAOLIN 12,5% DAN VARIASI AGREGAT LIMBAH PECAHAN KERAMIK

Mahendra Paramanandana Raharjo, Wibowo, Endah Safitri

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126. Telp: 0271 634524.

Email : wibowosipil87@ft.uns.ac.id

Abstract

Massive infrastructure development causes an increase in construction waste. This is what finally gave birth to environmentally green concrete innovations, one of which is the innovation of high-strength self-compacting concrete by using metakaolin as a cement substitute and recycled waste ceramic aggregate as a coarse aggregate substitute without reducing the strength of the concrete. This research uses an experimental method by testing CO₂ absorption and carbonation on high strength self compacting concrete directly in the laboratory. The test object used for testing CO₂ absorption and carbonation is a concrete cylinder with a diameter of 7.5 cm and a height of 15 cm. Based on the test results, substitution of 12.5% metakaolin by weight of cement and recycled waste ceramic aggregate variation met the self-compacting concrete parameters as stated in the EFNARC 2002. In the CO₂ absorption and carbonation tests, the minimum results were obtained in the substitution of 20% recycled waste ceramic aggregate. The addition of recycled waste ceramic can increase the compressive strength of concrete, but reduce CO₂ absorption and concrete carbonation because the aggregate of ceramic shard waste has an angular and non-uniform shape which can fill the concrete well and make the concrete denser. In addition, the recycled waste ceramic aggregate contains CSH so that it increases the strength between the concrete particles.

Keywords: Carbonation, CO₂ absorption, high strength self compacting concrete, metakaolin, recycled waste ceramic aggregate

Abstrak

Pembangunan infrastruktur yang semakin masif menyebabkan meningkatnya limbah konstruksi. Hal itu yang akhirnya melahirkan suatu inovasi beton ramah lingkungan, salah satunya adalah inovasi beton berkualitas tinggi memadat mandiri dengan penggunaan metakaolin sebagai substitusi semen dan agregat limbah pecahan keramik sebagai substitusi agregat kasar tanpa mengurangi kekuatan beton. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan melakukan pengujian serapan CO₂ dan karbonasi pada beton mutu tinggi memadat mandiri secara langsung di laboratorium. Benda uji yang digunakan untuk pengujian serapan CO₂ dan karbonasi berupa silinder beton dengan diameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm. Berdasarkan hasil pengujian, penggantian metakaolin 12,5% dari berat semen dan variasi agregat limbah pecahan keramik telah memenuhi parameter beton memadat mandiri seperti yang tercantun dalam EFNARC 2002. Pada pengujian serapan CO₂ dan karbonasi didapatkan hasil minimum pada substitusi agregat limbah pecahan keramik kadar 20%. Penambahan limbah pecahan keramik dapat meningkatkan kuat tekan beton, tetapi mengurangi serapan CO₂ dan karbonasi pada beton karena agregat limbah pecahan keramik memiliki bentuk bersudut dan tidak seragam yang dapat mengisi beton dengan baik dan menjadikan beton semakin padat. Selain itu agregat limbah pecahan keramik mengandung CSH sehingga menambah kekuatan antar partikel beton.

Kata Kunci: Agregat limbah pecahan keramik, beton mutu tinggi memadat mandiri, karbonasi, metakaolin, serapan CO₂.

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur pada beberapa waktu belakangan ini mengalami perkembangan yang sangat cepat. Tetapi dengan masifnya pembangunan infrastruktur di suatu negara akan berdampak buruk juga terhadap lingkungan karena limbah-limbah konstruksi akan semakin meningkat. Oleh sebab itu, diperlukan suatu cara untuk mengendalikan masalah limbah konstruksi yang semakin meningkat yaitu dengan menerapkan pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan atau *sustainable construction*. Salah satunya dengan melakukan inovasi pada beton untuk menghasilkan beton mutu tinggi namun tetap ramah lingkungan.

High Strength Self Compacting Concrete (HSSCC) merupakan beton mutu tinggi yang mampu memadat sendiri dengan nilai slump yang cukup tinggi (Jalal dkk., 2013; Khan dkk., 2017). Dalam proses penempatan pada volume bekesting (*placing*) dan proses pematatannya (*compaction*) tidak diperlukan proses penggetaran karena beton *Self Compacting Concrete* (SCC) memiliki *flowability* tinggi sehingga mampu untuk mengalir atau mengisi ruang di bekesting dengan merata dan tercapai kepadatan tertingginya sendiri secara menyeluruh serta memiliki kuat tekan yang tinggi (ashtiani dkk., 2013; Reddy, 2017). Beton jenis ini memiliki tingkat kekentalan yang tinggi sehingga diwajibkan menggunakan

bahan tambah kimia berupa *superplasticizer* untuk menambah *workability* dan mempertahankan parameter *Self Compacting Concrete* (Zeyad dan Almalki, 2020).

Metakaolin adalah hasil kaolin yang dibakar dalam suhu 450° C sampai 900 °C yang partikelnya berukuran dibawah *silica fume* dan kandungannya mayoritas adalah Al₂O₃ (42,87%) dan SiO₂ (54,64%) komponen utamanya semen, sehingga bisa dipakai guna pengganti semen (Muduli dan Mukharjee, 2019). Tambahan metakaolin guna pengganti bagian semen dikatakan dapat meningkatkan pemrosesan hidrasi dan bertindak sebagai *pozzolana*. Harapan penambahan metakaolin bisa mengoptimalkan daya kuat beton, menurunkan permeabilitas, dan mengoptimalkan padatan beton. Dan juga, SiO₂ yang terkandung di metakaolin bereaksi dengan Ca(OH)₂ yang diperoleh dari reaksi hidrasi semen untuk membentuk ikatan seperti gel dan menambah kekuatan ikat beton (Hidayat, 2018).

Pemilihan limbah pecahan keramik yang digunakan sebagai agregat kasar adalah upaya untuk menghasilkan beton yang ramah lingkungan (*green concrete*). Hal itu dikarenakan sekitar 60% - 70% beton terdiri dari agregat halus dan agregat kasar yang secara alami terdapat di alam dan diperoleh dari proses penambangan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penggantian agregat kasar alami dengan meningkatnya aktivitas pengikatan dan *pozzolan* dari limbah cullet keramik dan meningkatnya proporsi limbah keramik dengan menurunnya densitas beton, limbah cullet keramik bisa menambah kuat tekan, kuat belah dan kuat lentur (Rashid dkk., 2017; Awoyera dkk., 2018; Magbool, 2022) . Tetapi, pemakaian skrap keramik tampaknya mengurangi kemampuan kerja beton siap pakai, terbukti dari beton yang mengandung campuran skrap keramik yang memiliki slump lebih sedikit dibandingkan beton. tanpa campuran limbah keramik (Wicaksono & Sudjati, 2012).

Menurut Deni (2020), karbonasi pada beton merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap durabilitas beton. Pada dasarnya CO₂ tidak bersifat reaktif, tetapi untuk Indonesia yaitu negara dengan iklim tropis mempunyai kelembaban udara dan temperatur yang tinggi dapat meningkatkan agresivitas CO₂ dan menyebabkan CO₂ berubah menjadi asam karbonat cair, menabrak beton, dan meminimalisir alkalinitas beton. Di kasus ini, tingkat asam pori (pH) air dalam pasta semen keras berkurang, pelapis yang melindungi beton terdegradasi, tulang terbuka, dan terjadi korosi. Tulangan yang mengalami korosi bisa mengurangi kekuatan korelasi diantara tulangan dan beton, sehingga memperburuk mutu beton.

Kedalaman karbonasi akan mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu paparan dan hal itu sebanding dengan hasil uji serapan CO₂ (Nugroho, 2020). Untuk itu, dalam penelitian ini mengkaji pengaruh substitusi metakaolin 12,5% dari berat semen dan limbah pecahan keramik dengan kadar 20%, 30%, dan 40% dari berat total agregat kasar. Selanjutnya dilakukan uji serapan CO₂ dan karbonasi pada saat beton berumur 28 hari yang dibandingkan dengan beton tanpa penggunaan limbah pecahan keramik.

METODE

Pada studi ini menggunakan metode eksperimen dimana pengujiannya langsung dilakukan di laboratorium. Benda uji yang digunakan untuk pengujian serapan CO₂ dan karbonasi yaitu silinder beton dengan tinggi 15 cm dan diameter 7,5 cm. Jumlah benda uji yang digunakan pada pengujian serapan CO₂ yaitu 12 buah dan pada pengujian karbonasi yaitu 36 buah. Sebelum beton dituang ke cetakan, dilakukan pengujian beton segar untuk memastikan beton masuk dalam kategori *Self Compacting Concrete* (SCC) yang sesuai dengan EFNARC 2002. Pengujian serapan CO₂ dan karbonasi dilakukan setelah beton berumur 28 hari.

Mix Design

Mix design atau rancang campur beton berkualitas tinggi memadat sendiri dimana metakaolinnya sebesar 12,5% dan varian limbah pecahan keramik mengacu pada (EFNARC, BIBM, CEMBUREAU, EFCA, 2005). Pada penelitian ini, FAS yang digunakan sebesar 0,33 dimana *superplasticizer* Sika Viscocrete 1003 sebesar 1,5% dari berat semennya. Rancang campur beton didapatkan dengan *mengtrial* sehingga mencukupi standar yang digunakan. Perhitungan *mix design* beton disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi *mix design* beton HSSCC

Nama Benda Uji	Agregat Halus (kg/m ³)	Agregat Kasar Kerikil (kg/m ³)	Agregat Kasar Keramik (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Me-takaolin (kg/m ³)	Superplasti-cizer (lt/m ³)	Air (lt/m ³)
HSSCC-RWCA-0%	861,52	704,88	0,00	525	75	9	198
HSSCC-RWCA-20%	861,52	563,91	140,98	525	75	9	198
HSSCC-RWCA-30%	861,52	492,42	211,46	525	75	9	198
HSSCC-RWCA-40%	861,52	422,93	281,95	525	75	9	198

Pengujian Beton Segar

Uji dilakukan pada beton segar berjenis memadat mandiri (*Self Compacting Concrete*) dilakukan sesuai standart *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete* 2002 (EFNARC, 2002) dimana pengujiannya meliputi 3 jenis yakni *L-box test*, *slump flow test*, dan *V-funnel test*. Seluruh uji itu dilakukan guna menganalisa parameter beton HSSCC meliputi *passing ability*, *filling ability*, dan *segregation resistance*.

Pengujian Serapan CO₂

Uji penyerapan beton dilaksanakan dengan mencari nilai CO₂ yang diserap yang meresap ke dalam beton seluler. Nilai di mana CO₂ dapat masuk dalam beton aerasi diberikan sebagai persentase. Laju penyerapan CO₂ dalam uji serapan beton bisa dilakukan perhitungan dengan Persamaan [1].

$$SerapanCO_2 = \frac{W - Wk}{Wk} \times 100\% \dots\dots\dots [1]$$

Keterangan:

- W = Berat beton pada kondisi SSD atau kering permukaan (gram)
- Wk = Berat beton pada kondisi kering oven (gram)

Pengujian Karbonasi

Pengujian karbonasi dapat diukur dengan menggunakan sampel beton yang di-*seal* dan memberikannya larutan CO₂ 4% pada sisi atas sampel beton. Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan CO₂ untuk dapat mengalir melewati ketebalan beton dalam waktu tertentu. Pada uji kedalaman karbonasi, digunakan indikator *phenolphthalein* 1% untuk mengamati perubahan warna yang terjadi sehingga dapat diketahui kedalaman karbonasi beton. Perhitungan koefisien karbonasi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan [2].

$$k = \frac{x}{t^2} \dots\dots\dots [2]$$

Keterangan :

- k = Koefisien karbonasi (mm/tahun^{1/2})
- t = Waktu paparan (tahun)
- x = Kedalaman karbonasi (mm)

Perhitungan koefisien karbonasi dalam keadaan atmosfer normal (400 ppm atau 0,04% CO₂) bisa dicari hasilnya memakai Persamaan [3].

$$ka = \left(\frac{0,04\%}{m\%}\right)^{\frac{1}{2}} k \dots\dots\dots [3]$$

Keterangan :

- ka = Koefisien karbonasi pada kondisi atmosfer normal (mm/tahun^{1/2})
- 0,04% = Konsentrasi CO₂ dalam keadaan atmosfer normal

k = Koefisien karbonasi hasil pengujian (mm/tahun^{1/2})
 $m\%$ = Konsentrasi CO₂ yang dipakai dalam pengujian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Beton Segar

Dalam studi ini, dilaksanakan uji terhadap 3 jenis beton segar HSSCC yaitu, *l-box*, uji *slump flow*, dan *v-funnel*. Rekapitulasi hasil pengujian beton segar secara berurutan ditunjukkan Tabel 2, 3, dan 4.

Tabel 2. Hasil pengujian *slump flow*

Nama Benda Uji	T _{500rerata} (detik)	Syarat	Ket	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _{rerata} (mm)	Syarat	Ket
HSSCC-RWCA-0%	3,5		√	720	710	715		√
HSSCC-RWCA-20%	3,5	2-5 detik	√	690	680	685	650-800 mm	√
HSSCC-RWCA-30%	4,3	EFNARC	√	680	650	665	EFNARC	√
HSSCC-RWCA-40%	4,5	2005	√	660	650	655	2005	√

keterangan: √ = memenuhi syarat

Tabel 3. Hasil pengujian *l-box*

Nama Benda Uji	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₂ /h ₁	Syarat	Kesimpulan
HSSCC-RWCA-0%	9	9	1		Memenuhi syarat
HSSCC-RWCA-20%	9	9	1	0,8-1	Memenuhi syarat
HSSCC-RWCA-30%	9	10	0,9	EFNARC 2005	Memenuhi syarat
HSSCC-RWCA-40%	9	11	0,82		Memenuhi syarat

Tabel 4. Hasil pengujian *v-funnel*

Nama Benda Uji	V-funnel (detik)	Syarat	Kesimpulan
HSSCC-RWCA-0%	9		Memenuhi syarat
HSSCC-RWCA-20%	10	6-25 detik	Memenuhi syarat
HSSCC-RWCA-30%	11	EFNARC 2005	Memenuhi syarat
HSSCC-RWCA-40%	22		Memenuhi syarat

Berdasarkan pemaparan hasil uji beton segar, bisa ditarik simpulan bahwasanya substitusi metakaolin 12,5% dari berat semen dan variasi agregat limbah pecahan keramik dengan kadar 20%, 30%, dan 40% dari berat agregat total agregat kasar telah mencukupi persyaratan sebagai pematatan beton mandiri sesuai dengan standar EFNARC 2002.

Hasil Pengujian Serapan CO₂

Data uji serapan CO₂ ditunjukkan Tabel 5 dan 6. Tabel 5 menunjukkan bahwa dengan penggunaan agregat limbah pecahan keramik dengan kadar 20% ;30%; dan 40% mengalami penurunan serapan CO₂ jika dibandingkan dengan beton tanpa agregat limbah pecahan keramik pada perendaman 10+0,5 menit dengan persentase penurunan berturut-turut sebesar 52,99%; 40,30% dan 11,19%. Selain itu, nilai serapan CO₂ beton minimum terjadi pada penggunaan agregat limbah pecahan keramik dengan kadar 20% dari berat total agregat kasar.

Tabel 6 menunjukkan bahwa dengan penggunaan agregat limbah pecahan keramik dengan kadar 20% ;30%; dan 40% mengalami penurunan serapan CO₂ jika dibandingkan dengan beton tanpa agregat limbah pecahan keramik pada perendaman 24 jam dengan persentase penurunan berturut-turut sebesar 37,84%; 27,48% dan 10,36%. Selain itu, nilai serapan CO₂ beton minimum terjadi pada penggunaan agregat limbah pecahan keramik dengan kadar 20% dari berat total agregat kasar.

Tabel 5. Hasil Pengujian Serapan CO₂ Beton Perendaman 10+0,5 Menit

Nama Benda Uji	Kode	Berat Kering Oven (gram)	Berat SSD (gram)	Serapan (%)	Serapan Rerata (%)	Penurunan (%)
HSSCC-RWCA-0%-SCO	A	1509,5	1529,0	1,29	1,34	
	B	1529,5	1550,0	1,34		
	C	1514,5	1535,5	1,39		

Nama Benda Uji	Kode	Berat Kering Oven (gram)	Berat SSD (gram)	Serapan (%)	Serapan Rerata (%)	Penurunan (%)
HSSCC-RWCA-20%-SCO	A	1472,0	1479,5	0,51	0,63	52,99
	B	1419,0	1429,5	0,74		
	C	1462,0	1471,5	0,65		
HSSCC-RWCA-30%-SCO	A	1488,0	1501,0	0,87	0,80	40,30
	B	1527,0	1539,5	0,82		
	C	1541,5	1552,5	0,71		
HSSCC-RWCA-40%-SCO	A	1525,0	1544,0	1,25	1,19	11,19
	B	1492,5	1512,0	1,31		
	C	1464,5	1479,5	1,02		

Tabel 6. Hasil pengujian serapan CO₂ beton perendaman 24 Jam

Nama Benda Uji	Kode	Berat Kering Oven (gram)	Berat SSD (gram)	Serapan (%)	Serapan Rerata (%)	Penurunan (%)
HSSCC-RWCA-0%-SCO	A	1509,5	1543,0	2,22	2,22	
	B	1529,5	1563,0	2,19		
	C	1514,5	1548,5	2,24		
HSSCC-RWCA-20%-SCO	A	1472,0	1485,0	0,88	1,38	37,84
	B	1419,0	1444,5	1,80		
	C	1462,0	1483,5	1,47		
HSSCC-RWCA-30%-SCO	A	1488,0	1510,0	1,48	1,61	27,48
	B	1527,0	1555,0	1,83		
	C	1541,5	1565,0	1,52		
HSSCC-RWCA-40%-SCO	A	1525,0	1555,0	1,97	1,99	10,36
	B	1492,5	1518,5	1,74		
	C	1464,5	1497,5	2,25		

Hasil Pengujian Karbonasi

Data uji karbonasi ditunjukkan Tabel 7 dan 8.

Tabel 7. Koefisien Karbonasi Hasil Pengujian Beton HSSCC

Nama Benda Uji	Koefisien Karbonasi (mm/tahun ^{1/2})			
	7 hari	14 hari	28 hari	Rerata
HSSCC-RWCA-0%-SCO	51,32	53,51	59,95	54,92
HSSCC-RWCA-20%-SCO	18,80	28,63	36,32	27,92
HSSCC-RWCA-30%-SCO	27,49	38,11	45,10	36,90
HSSCC-RWCA-40%-SCO	38,61	48,42	52,54	46,53

Tabel 7 menunjukkan hasil koefisien karbonasi untuk uji karbonasi laboratorium dipercepat, yaitu dengan konsentrasi CO₂ 4%. Selanjutnya, mencari koefisien karbonasi nominal, yaitu saat keadaan atmosfer normal dalam koefisien karbonasi (400 ppm atau 0,04% CO₂).

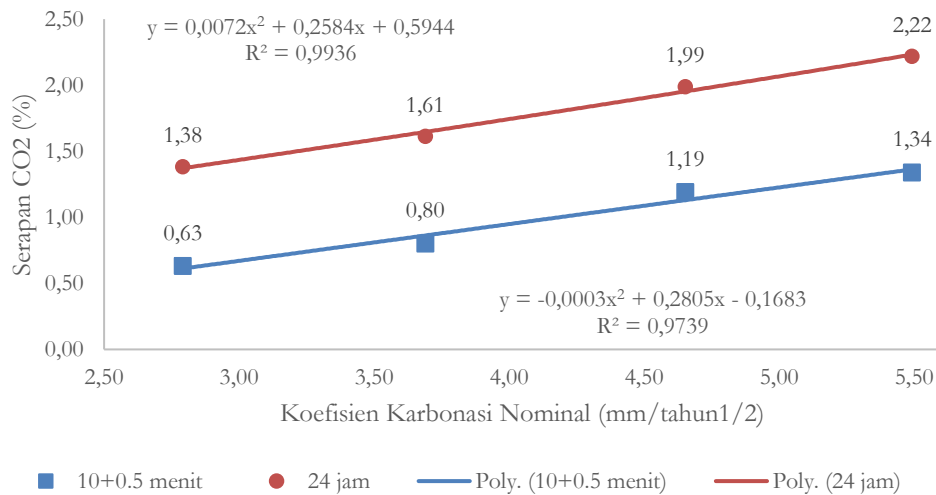
Tabel 8. Koefisien Karbonasi Nominal Beton HSSCC

Nama Benda Uji	Koefisien Karbonasi (mm/tahun ^{1/2})	
	K _{4%CO₂}	K _{0,04%CO₂}
HSSCC-RWCA-0%-SCO	54,92	5,49
HSSCC-RWCA-20%-SCO	27,92	2,79
HSSCC-RWCA-30%-SCO	36,90	3,69
HSSCC-RWCA-40%-SCO	46,53	4,65

Tabel 8 diatas menunjukkan nilai koefisien karbonasi beton nominal dengan penggunaan agregat limbah pecahan keramik dengan kadar 0%; 30%; dan 40% kisarnya antara 3 mm/tahun^{1/2} hingga 6 mm/tahun^{1/2} sehingga tergolong kategori beton berkualitas sedang. Beton dengan penggunaan agregat limbah pecahan keramik dengan kadar 20% dihasilkan koefisien karbonasi beton nominal lebih kecil dari 3 mm/tahun^{1/2} yang artinya beton tersebut dikategorikan sebagai beton berkualitas baik.

Hubungan Serapan CO₂ dan Koefisien Karbonasi Nominal HSSCC

Dari hasil pengujian serapan CO₂ dan karbonasi dapat dibuat perbandingan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik hubungan antara serapan dengan koefisien karbonasi nominal HSSCC

Gambar 1 menunjukkan bahwa hubungan antara nilai serapan CO₂ akan berbanding lurus dengan laju karbonasi. Semakin tinggi kedalaman karbonasi maka semakin tinggi koefisien karbonasi dan semakin tinggi pula nilai serapan CO₂ beton. Hal tersebut terjadi dikarenakan tingkat porositas beton yang besar akan menjadi media untuk masuknya cairan atau gas yang dapat menyebabkan meningkatkan nilai kedalaman karbonasi dan nilai serapan CO₂.

SIMPULAN

Bersumber hasil uji dan pengolahan data yang sudah disampaikan sebelumnya, bisa dibuat simpulan berupa:

1. Penambahan variasi agregat limbah pecahan keramik memenuhi syarat parameter *passing ability*, *filling ability*, dan *segregation resistance* sesuai standar EFNARC 2005. Sehingga penambahan variasi agregat limbah pecahan keramik memenuhi sebagai beton HSSCC (*High Strength Self Compacting Concrete*) dengan metakaolin 12,5% sebagai substitusi semen.
2. Penambahan variasi agregat limbah pecahan keramik pada beton HSSCC (*High Strength Self Compacting Concrete*) dengan metakaolin 12,5% sebagai substitusi semen dan variasi agregat limbah pecahan keramik 0%; 20%; 30%; dan 40% memperoleh nilai serapan CO₂ pada perendaman 10+0,5 menit berturut-turut sebesar 1,34%; 0,63%; 0,80%; dan 1,19%. Pada waktu perendaman 24 jam memperoleh nilai serapan CO₂ berturut-turut sebesar 2,22%; 1,38%; 1,61%; dan 1,99%;
3. Penambahan variasi agregat limbah pecahan keramik pada beton HSSCC (*High Strength Self Compacting Concrete*) dengan metakaolin 12,5% sebagai substitusi semen dan variasi agregat limbah pecahan keramik 0%; 20%; 30%; dan 40% memperoleh nilai koefisien karbonasi nominal berturut-turut sebesar 5,49 mm/tahun^{1/2}; 2,79 mm/tahun^{1/2}; 3,69 mm/tahun^{1/2}; dan 4,65 mm/tahun^{1/2}.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis tujukan kepada seluruh dosen, mahasiswa, dan laboran di Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret yang telah membantu dalam kegiatan penelitian dan penulisan artikel ini.

REFERENSI

- Ashtiani, M., Dhakal, R., & Scott, A., 2013. Post-yield bond behaviour of deformed bars in high-strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 44, pp. 236-248. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.02.072>.
- Awoyera, P.O., Ndambuki, J.M., Akinmusuru, J.O. and Omole, D.O., 2018. Characterization of ceramic waste aggregate concrete. *HBRC journal*, 14(3), pp.282-287.
- Deni, D. P. (2020). *Kajian Serapan Co2 Dan Karbonasi Pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Komposisi Metakaolin The Study Of Co2 Absorption And Carbonation On High Strength Self Compacting Concrete With Metakaolin Composition Variation*.
- EFNARC, BIBM, CEMBUREAU, EFCA, E. (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete*, 63. <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
- EFNARC. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. *Report from EFNARC*, 44(February), 32. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Specification+and+Guidelines+for+Self-Compacting+Concrete#0>
- Hidayat, C. (2018). *Kajian Pengaruh Variasi Faktor Air Semen Dan Metakaolin Terhadap Kinerja Kuat Tekan Beton Memadat Mandiri Mutu Tinggi*.
- Jalal, M., Fathi, M., & Farzad, M., 2013. Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mechanics of Materials*, 61, pp. 11-27. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMAT.2013.01.010>.
- Khan, A., Do, J., & Kim, D., 2017. Experimental Optimization of High-Strength Self-Compacting Concrete Based on D-Optimal Design. *Journal of Construction Engineering and Management-asce*, 143, pp. 04016108. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001230](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001230).
- Magbool, H.M., 2022. Utilisation of ceramic waste aggregate and its effect on Eco-friendly concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 47, p.103815.
- Muduli, R. and Mukharjee, B.B., 2019. Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Journal of cleaner production*, 209, pp.398-414.
- Nugroho, Y. A. (2020). *Kajian Serapan Co2 Dan Karbonasi Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Metakaolin 12, 5? n Variasi Fly Ash The Study Of Co2 Absorption And Carbonation High Strength Self Compacting Concrete With Metakaolin 12, 5% And Fly Ash Variation*.
- Rashid, K., Razzaq, A., Ahmad, M., Rashid, T. and Tariq, S., 2017. Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, 154, pp.829-840.
- Reddy, P., 2017. Study on Fresh and Hardened Properties of High Strength Self Compacting Concrete with Metkaolinand Microsilicaas Mineral Admixture (M70 Grade). *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, pp. 2278-2283. <https://doi.org/10.22214/IJRASET.2017.11320>.
- Wicaksono, K. D., & Sudjati, J. J. (2012). Pemanfaatan Limbah Keramik Sebagai Agregat Kasar dalam Adukan Beton. *Laporan Penelitian Konteks*, 4(1), 16–24.
- Zeyad, A., & Almalki, A., 2020. Influence of mixing time and superplasticizer dosage on self-consolidating concrete properties. *Journal of materials research and technology*, 9, pp. 6101-6115. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.013>.