

KAJIAN KUAT LEKAT BETON MEMADAT MANDIRI MUTU TINGGI DENGAN METAKAOLIN 12,5% DAN VARIASI AGREGAT LIMBAH PECAHAN KERAMIK

Wibowo, Endah Safitri, Dinda Imas Nurdhyanti

Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta

Jl. Ir. Sutami 36 A, Kentingan Surakarta, Jawa Tengah 57126

*Email: wibowotsipil87@gmail.com

Abstract

The implementation of sustainable construction closely related to the presence of concrete technology, therefore the necessary to developed research about concrete innovation which had high strength and proper flow ability nevertheless still environmentally friendly. This research intended to specify the effect from the substitution of metakaolin and the substitution of recycled waste ceramic aggregate on high strength self-compacting concrete, specifically the bond strength. The method used in this research was an experimental method. Metakaolin acts as a cement substitution material, while the recycled waste ceramic aggregate acts as a substitute for coarse aggregate. The specimens in this study were a cube concrete with 15 cm length for each side and the reinforcement with 10 mm diameter. The bond strength was tested on 28 day-old concrete by pulling out the reinforcement while record the required load on the Universal Testing Machine (UTM) and LVDT sensor that connected to digital load meter device. The results of this study indicated the use of metakaolin and the substitution of recycled waste ceramic aggregate for natural coarse aggregate improved the strength of concrete. The substitution of variations recycled waste ceramic aggregate with levels of 0%; 20%; 30%; and 40% resulted in a successive of bond strength value 5,14 MPa; 8,03 MPa; 7,56 MPa; and 5,73 MPa. The value of bond strength decrease along with the increased substitution of recycled waste ceramic aggregate after surpassing the substitution level on 20%.

Keywords: bond strength, high strength self-compacting concrete, metakaolin, recycled waste ceramic aggregate

Abstrak

Pelaksanaan konstruksi berkelanjutan berkaitan erat dengan adanya teknologi beton, sehingga perlu dikembangkannya penelitian inovasi beton yang memiliki mutu tinggi dan memiliki kemampuan mengalir yang baik dalam melewati tulangan namun tetap ramah terhadap lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan efek substitusi metakaolin dan variasi agregat limbah pecahan keramik pada kualitas beton memadat mandiri mutu tinggi khususnya kuat lekat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Metakaolin berperan sebagai bahan substitusi semen sedangkan agregat limbah pecahan keramik berperan sebagai bahan substitusi agregat kasar. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini berupa kubus dengan panjang sisi 15 cm serta tulangan ulir diameter 10 mm. Uji kuat lekat dilaksanakan pada beton berumur 28 hari dengan cara menarik tulangan serta mencatat beban dan *displacement* yang terbaca pada *Universal Testing Machine* (UTM) dan sensor LVDT yang disambungkan pada alat *digital load meter*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan metakaolin dan substitusi agregat kasar dengan agregat limbah pecahan keramik mampu meningkatkan mutu beton. Penggantian variasi agregat limbah pecahan keramik dengan kadar 0%; 20%; 30%; dan 40% menghasilkan nilai kuat lekat berturut-turut 5,14 MPa; 8,03 MPa; 7,56 MPa; dan 5,73 MPa. Kuat lekat beton semakin menurun seiring bertambahnya substitusi agregat limbah pecahan keramik saat melebihi penggantian kadar agregat limbah pecahan keramik sebanyak 20%.

Kata Kunci : agregat limbah pecahan keramik, beton mutu tinggi memadat mandiri, kuat lekat, metakaolin.

PENDAHULUAN

Majelis Umum PBB mengusulkan serangkaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) global yang terdiri dari 17 tujuan dan 169 target di New York pada tahun 2015 (Lee dkk., 2016). Pelaksanaan pembangunan berkelanjutan merupakan upaya penerapan poin ke sembilan dari tujuh belas Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) atau Tujuan Global oleh Perserikatan Bangsa Bangsa (PBB) yaitu *industry, innovation, and infrastructure*. Yang berkaitan erat dengan adanya teknologi beton, sehingga perlu dikembangkan penelitian inovasi beton yang memiliki mutu yang tinggi namun tetap ramah terhadap lingkungan. Semakin berkembangnya pembangunan infrastruktur yang semakin modern tidak terlepas dari semakin rumitnya berbagai bentuk desain bangunan yang menyebabkan semakin banyaknya tulangan yang digunakan dan menyebabkan sulitnya beton segar untuk mengalir di dalam tulangan.

Di Eropa sendiri, jumlah limbah pecahan keramik yang dihasilkan sebesar 3% - 7% produksi dunia dan kebanyakan berakhir di tempat sampah (Zareei, et al., 2019). Tidak dapat dijualnya bongkaran limbah keramik lantai yang kebanyakan sudah hancur menjadi pecahan-pecahan keramik lantai menyebabkan limbah konstruksi menumpuk di lingkungan sehingga diperlukannya inovasi dan penelitian lebih lanjut terkait daur ulang limbah pecahan keramik menjadi agregat daur ulang.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengkaji efektivitas limbah keramik sebagai bahan campuran beton (Raval dkk., 2013; Awoyera dkk., 2018; Magbool, 2022). Passos, et al., (2019) melakukan penelitian untuk mengevaluasi kekuatan ikatan dari campuran beton yang dihasilkan beserta campuran agregat limbah keramik dengan tulangan baja. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa substitusi dari agregat kasar alami dengan agregat kasar daur ulang dari limbah keramik dapat bertahan apabila agregat limbah keramik memiliki kemampuan untuk menjaga ikatan antara tulangan baja dan beton, bahkan untuk 100% tingkat penggantian agregat kasar.

Dengan semakin tingginya kebutuhan di dunia konstruksi akan beton mutu tinggi memadat mandiri berbanding lurus dengan berbagai masalah lingkungan yang timbul dimana berdampak negatif terhadap lingkungan dengan dihasilkannya debu dan CO₂, semakin tingginya limbah padat konstruksi, serta masih dibutuhkan untuk penelitian lanjutan terkait kuat lekat dengan menggunakan agregat daur ulang limbah pecahan keramik pada beton, melatarbelakangi dilakukannya penelitian ini.

Penggunaan material metakaolin yang merupakan bahan substitusi semen pada penelitian ini memiliki peran menambah kerekatan dan mengisi rongga kosong sebagai *filler* yang berdampak positif pada porositas beton, sedangkan agregat limbah pecahan keramik merupakan bahan substitusi agregat kasar yang memiliki reaksi *pozzolanic* sebagai *chemical anchorage* dan bentuk agregat yang lebih bersudut sebagai *physical anchorage* sehingga mampu menambah kekuatan lekat pada beton.

Beton Mutu Tinggi (*High Strength Concrete*)

Beton mutu tinggi di Indonesia menurut SNI 03-6468-2000, memiliki definisi sebagai beton yang memiliki kuat tekan yang disyaratkan bernilai lebih besar sama dengan 41,4 MPa. Tercapainya beton mutu tinggi disebabkan oleh berbagai faktor dari cara pembuatan, yaitu faktor air dan semen, pemilihan material penyusun, tingkat gradasi agregat, dan kehalusan butir semen

Beton Memadat Mandiri (*Self-Compacting Concrete*)

Suatu beton dengan kemampuan secara mandiri mengalir melewati tulangan, mengisi setiap rongga dalam bekisting, dan mampu memadat tanpa diperlukan alat pemadat disebut dengan beton memadat mandiri. Komposisi material berupa agregat halus, agregat kasar, air, semen, *superplasticizer* sebagai bahan tambah kimia, dan bahan pengisi atau *filler* merupakan material penyusun *self-compacting concrete*.

Beton Bertulang (*Reinforced Concrete*)

Beton bertulang adalah beton yang mengandung batang tulangan dan direncanakan berdasarkan anggapan bahwa kedua bahan tersebut bekerja sama dalam memikul gaya-gaya (PBI, 1971). Dalam konstruksi beton bertulang, baja tulangan merupakan material penyusun yang paling penting dalam struktur beton bertulang dimana baja tulangan untuk menahan gaya tarik, sedangkan beton untuk menahan gaya tekan.

Beton Ramah Lingkungan (*Green Concrete*)

Beton ramah lingkungan merupakan beton yang tersusun atas material yang tidak merusak lingkungan dimana salah satunya adalah upaya penggantian agregat penyusun beton dengan material agregat yang ramah terhadap lingkungan (Widyawati, 2011).

Metakaolin

Metakaolin adalah bentuk terkalsinasi dari mineral lempung kaolinite. Ukuran partikel metakaolin lebih kecil dari partikel semen, namun memiliki kehalusan yang lebih kecil daripada *silica fume*. Dalam menghasilkan sebuah *pozzolan* yang baik maka diperlukan suhu aktivasi optimal yang bervariasi antara 550°C sampai 850°C dengan durasi yang bervariasi.

Agregat Limbah Pecahan Keramik (*Recycled Waste Ceramic Aggregate*)

Dalam perencanaan beton ramah lingkungan, penggunaan material agregat kasar alami dapat diganti secara sebagian atau keseluruhan dengan agregat pecahan keramik dari limbah padat sisa konstruksi. Limbah pecahan keramik sebagai substitusi agregat kasar yang digunakan dalam melaksanakan penelitian ini berasal dari keramik lantai yang telah tidak terpakai yang bersumber dari limbah manufaktur dan cacat produksi lantai keramik atau sejenisnya.

Kuat Lekat pada Beton (*Bond Strength of Concrete*)

Kuat lekat pada beton adalah kemampuan gabungan terhadap baja tulangan dan material beton yang melapisinya dalam menahan berbagai gaya yang dapat memutuskan lekatan antara baja tulangan dan material beton (Winter & Nilson, 1993). Dalam ASTM C-234-91a didefinisikan tegangan lekat kritis adalah tegangan paling kecil yang mengakibatkan terjadinya sesar pada beton sehingga baja yang tertanam didalam beton mengalami *slip* sebesar 0,25 mm, oleh sebab itu apabila sesar beton melebihi nilai 0,25 mm maka beton dianggap telah mengalami keruntuhan.

METODE

Metode yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental atau uji coba. Pengujian yang dilakukan terhadap workabilitas beton segar SCC yaitu *slump-flow test*, *v-funnel test*, dan *l-box test*. Gambar 1 menunjukkan benda uji yang digunakan pada penelitian ini berupa kubus dengan panjang sisi 15 cm serta tulangan ulir diameter 10 mm.



Gambar 1. benda uji pengujian kuat lekat

Pada Gambar 1 ditunjukkan benda uji kuat lekat berumur 28 hari yang akan di uji dengan cara menarik tulangan serta mencatat beban dan *displacement* yang terbaca pada *universal testing machine* dan sensor LVDT yang disambungkan pada alat *digital load meter*. Tabel 1 menunjukkan banyaknya sampel yang digunakan pada kadar substitusi agregat limbah pecahan keramik pada benda uji masing-masing dalam penelitian.

Tabel 1. Rekapitulasi Benda Uji Kuat Lekat Beton

Kadar Metakaolin	Kadar RWCA	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Jumlah
12,5%	0%	HSSCC-RWCA-0%	28	3
	20%	HSSCC-RWCA-20%	28	3
	30%	HSSCC-RWCA-30%	28	3
	40%	HSSCC-RWCA-40%	28	3
Total Benda Uji				12

Pada Tabel 1 menunjukkan variasi kadar agregat limbah pecahan keramik atau *Recycled Waste Ceramic Aggregate* (RWCA) yang digunakan sebagai substitusi agregat kasar alami adalah sebesar 0%; 20%; 30% dan 40%.

Rancang Campur Adukan Beton (*Mix Design*)

Rancang campur adukan beton mutu tinggi memadat mandiri (*high strength self-compacting concrete*) dengan variasi limbah pecahan keramik sebagai substitusi agregat kasar berpedoman pada peraturan *European Federation of National Associations Representing for Concrete* (EFNARC) 2005. Tabel 2 menyajikan rincian perhitungan rancangan campuran adukan beton (*mix design*).

Tabel 2. Rekapitulasi Rancang Campur Adukan Beton (*Mix Design*)

Kadar Metakaolin	Kadar RWCA	Agregat Halus (kg/m ³)	Agregat Kasar (kg/m ³)	Agregat Keramik (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Metakaolin (kg/m ³)	<i>Superplasticizer</i> (lt/m ³)	Air (lt/m ³)
12,5%	0%	861,52	704,88	0	525	75	9	198
	20%	861,52	563,91	140,97	525	75	9	198
	30%	861,52	493,42	211,47	525	75	9	198
	40%	861,52	422,93	281,95	525	75	9	198

Tabel 2 menunjukkan rekapitulasi rancang campur adukan beton dengan metakaolin yang digunakan pada penelitian ini, dimana Faktor air semen yang digunakan pada *mix design* ini adalah 0,33 dengan kadar optimum *superplastisizer* sebesar 1,5%.

Pengujian Workabilitas Beton Segar SCC (*Workability Self-Compacting Concrete Testing*)

Workabilitas beton ditentukan dari parameter beton memadat mandiri yang ditentukan dari pengujian: *passing ability*, *filling ability*, dan *segregation resistance*. Pengaruh penambahan metakaolin dengan kadar 12,5% dan variasi substitusi agregat limbah pecahan keramik terhadap workabilitas beton dapat ditentukan melalui pengujian beton segar SCC. Pada penelitian ini standar pengujian parameter beton memadat mandiri berdasarkan EFNARC 2005.

Pengujian Kuat Lekat (*Pull-Out Test*)

Nilai kuat lekat dapat dihitung dengan rumus pada Persamaan 1 dan Persamaan 2.

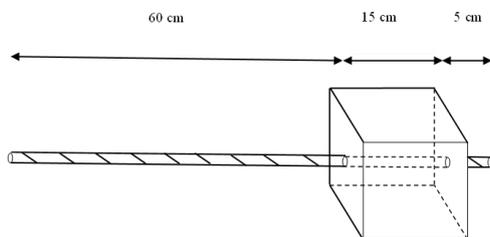
$$P = L_d \times \pi \times d \times \mu \dots\dots\dots [1]$$

$$\mu = \frac{P}{L_d \times \pi \times d} \dots\dots\dots [2]$$

keterangan:

- P = beban (N)
- d = diameter tulangan baja (mm)
- L_d = panjang penanaman (mm)
- μ = kuat lekat (MPa)

Benda uji yang digunakan adalah kubus berdimensi 15 cm setiap sisinya, dapat dilihat ilustrasi benda uji kuat lekat pada Gambar 2 serta proses pengujian kuat lekat yang disajikan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 2. Ilustrasi benda uji kuat lekat

Gambar 3. Pengujian kuat lekat beton

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Parameter Workabilitas Beton Segar SCC

Rekapitulasi hasil pengujian beton segar yang telah dilakukan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3 hingga 5.

Tabel 3. Rekapitulasi hasil uji *Slump Flow*

Kadar Metakaolin	T ₅₀₀ Rerata (detik)	Syarat	Ket.	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D Rerata (mm)	Syarat	Ket.
12,5%	3,5	2-5 detik EFNARC 2005	V	720	710	715	650 – 800 mm EFNARC 2005	V
	3,5		V	690	680	685		V
	4,3		V	680	650	665		V
	4,3		V	660	650	655		V

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Uji *V-funnel*

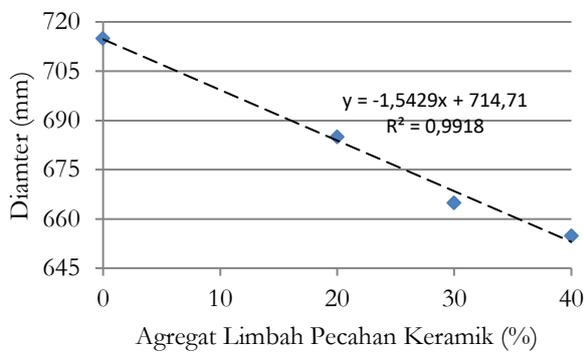
Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Uji *L-box*

Kadar Metakaolin	V-funnel (detik)	Syarat	Ket.
12,5%	9	2-5 detik EFNARC 2005	V
	10		V
	11		V
	22		V

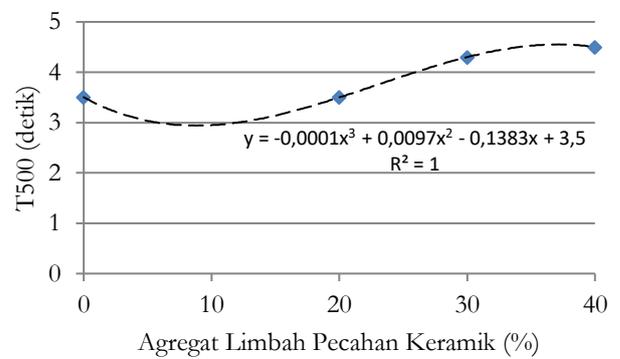
Kadar Metakaolin	h2 (mm)	h1 (mm)	h1/h2	Syarat	Ket.
12,5%	9	9	1	0,8-1 detik EFNARC 2005	V
	9	9	1		V
	9	10	0,9		V
	9	11	0,82		V

Keterangan :
 V = memenuhi syarat

Berdasarkan Tabel 3 sampai Tabel 5 membuktikan bahwa beton metakaolin 12,5% dengan variasi agregat limbah pecahan keramik pada penelitian ini memenuhi parameter sebagai beton SCC sesuai dengan standar EFNARC 2005. Gambar 4 sampai Gambar 7 menunjukkan pengaruh metakaolin sebagai bahan tambah dan variasi agregat limbah pecahan keramik sebagai substitusi agregat kasar alami pada workabilitas beton segar disajikan dalam bentuk grafik.

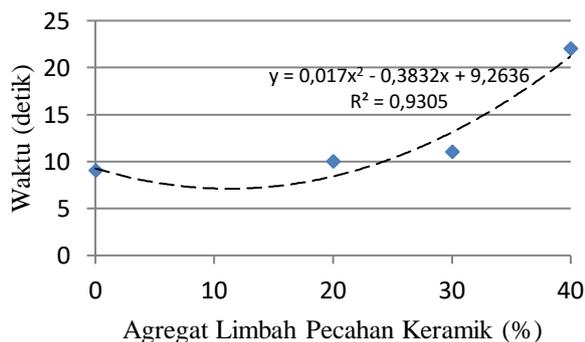


Gambar 4. Grafik diameter rerata *Slump Flow*

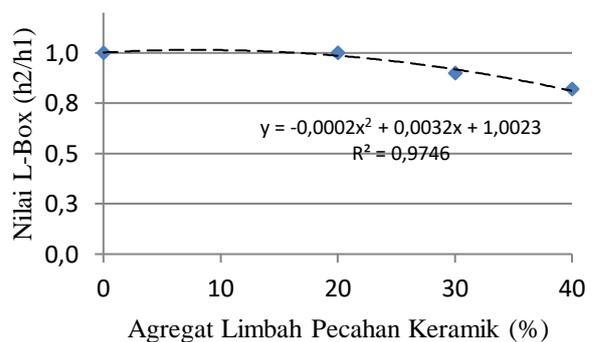


Gambar 5. Grafik T_{500} *Slump Flow*

Pada Gambar 4 dapat diketahui diameter *Slump Flow* semakin kecil seiring dengan semakin bertambahnya kadar agregat limbah pecahan keramik dan pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa dari pengujian *Flow Table Test* semakin tinggi penggantian kadar agregat kasar alami dengan agregat limbah pecahan keramik menyebabkan semakin melambatnya waktu aliran beton segar.



Gambar 6. Grafik nilai waktu alir *V-Funnel*



Gambar 7. Grafik nilai h_1/h_2 *L-box*

Dari grafik pada Gambar 6 menunjukkan bahwa semakin besar kadar penggantian agregat kasar alami dengan agregat limbah pecahan keramik, maka semakin lambat aliran beton segar yang mengalir melewati *v-funnel* dan Gambar 7 dapat dilihat bahwa pada uji *L-box*, kemampuan *passing ability* beton segar semakin menurun dengan semakin bertambahnya kadar penggantian agregat alami dengan agregat limbah pecahan keramik.

Hasil Pengujian Kuat Lekat Beton

Pengujian kuat lekat dilaksanakan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) pada benda uji kuat lekat beton yang telah berumur 28 hari. Rekapitulasi hasil pengujian kuat lekat beton metakaolin dan variasi agregat limbah pecahan keramik disajikan pada Tabel 6.

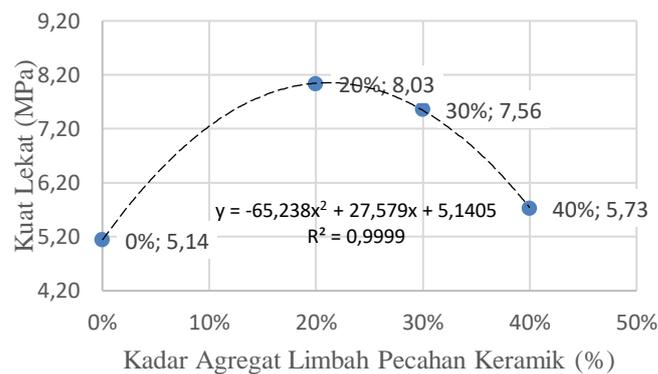
Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Lekat Beton

Benda Uji	Kode Benda Uji	Panjang Penyaluran (mm)	Diameter Baja (mm)	Beban Maksimum (N)	Kuat Lekat (MPa)	Kuat Lekat Rerata (mm)	Kenaikan (%)
HSSCC-RWCA-0%	A	150	10	2350	5,08	5,14	-
	B	150	10	2400	5,19		
	C	150	10	2390	5,16		
HSSCC-RWCA-20%	A	150	10	3700	8,00	8,03	56,16
	B	150	10	3720	8,04		
	C	150	10	3730	8,06		
HSSCC-RWCA-30%	A	150	10	3500	7,56	7,56	47,06
	B	150	10	3510	7,58		
	C	150	10	3490	7,54		
HSSCC-RWCA-40%	A	150	10	3020	6,53	5,73	11,34
	B	150	10	3000	6,48		
	C	150	10	2980	6,44		

Berdasarkan Tabel 6. dapat dilihat bahwa pada kadar 20% diperoleh nilai maksimum kuat lekat sebesar 8,03 MPa. Kenaikan nilai kuat lekat dari kadar 0% yang terjadi pada beton HSSCC kadar 20%; 30%; dan 40% yaitu sebesar 56,16%; 47,06%; dan 11,34%.

Pembahasan Hubungan Kuat Lekat Beton dengan Variasi Agregat Limbah Pecahan Keramik

Berdasarkan Tabel 6, dapat diketahui bahwa penggantian variasi agregat limbah pecahan keramik dengan kadar penggantian yang semakin besar berbanding terbalik dengan semakin kecilnya nilai kuat lekat pada beton. Grafik hubungan antara kuat lekat dan variasi kadar agregat limbah pecahan keramik dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik hubungan kuat lekat dengan variasi agregat limbah keramik

Gambar 8 menunjukkan bahwa pada penambahan kadar agregat limbah pecahan keramik 20%; 30%; dan 40% mengalami kenaikan nilai secara berturut-turut 8,03 MPa; 7,56 MPa; dan 5,73 MPa dari beton kadar agregat limbah pecahan keramik 0% dengan nilai 5,14 MPa. Serta besar kenaikan dari beton tanpa penggantian agregat kasar berupa pecahan limbah keramik secara berturut-turut yaitu: 56,16%; 47,06%; dan 11,34%.

Pembahasan Hubungan Kuat Lekat dengan Kuat Tekan Beton

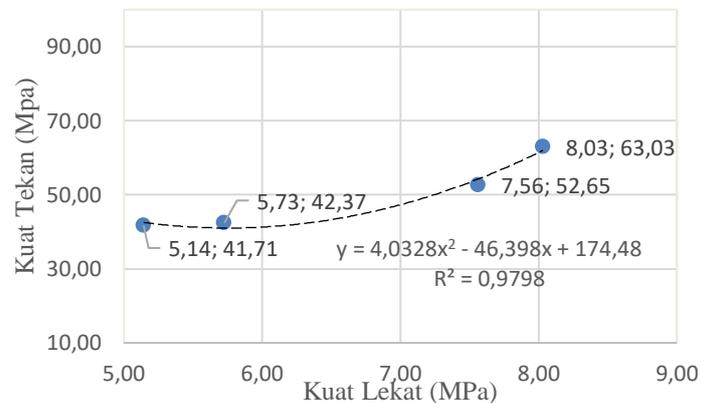
Kuat lekat beton tidak terlepas dari faktor kualitas suatu beton, dimana semakin tinggi kuat lekat beton pada struktur beton akan berbanding lurus dengan kuat tekan yang dihasilkan, dimana semakin padat partikel-partikel

keras dalam beton dengan permukaan tulangan maka akan dihasilkan lekatan yang semakin besar pula. Hubungan antara hasil nilai kuat tekan dengan kuat lekat beton pada penelitian ini disajikan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Nilai Kuat Lekat dan Kuat Tekan Beton

Kadar RWCA	Kuat Lekat (MPa)	Kuat Tekan (MPa)
0%	5,14	41,71
20%	8,03	63,03
30%	7,56	52,65
40%	5,73	42,37

Berdasarkan Tabel 7 untuk semua kadar variasi agregat limbah pecahan keramik memiliki nilai mutu kuat tekan beton >41,4 MPa sehingga memenuhi syarat menurut SNI 03-6468-2000, serta dapat diketahui kuat tekan beton memiliki pengaruh terhadap kuat lekat antara beton dan tulangan dimana nilai kuat lekat beton cenderung untuk meningkat seiring semakin besarnya nilai kuat tekan beton, dari nilai pengujian kuat tekan dan kuat lekat diolah menjadi grafik hubungan kuat lekat dan kuat tekan beton pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik hubungan kuat lekat dengan kuat tekan beton

Didapatkan dari Gambar 9 bahwa substitusi agregat kasar alami dengan agregat limbah pecahan keramik pada penelitian ini memberikan hasil yang baik pada mutu beton serta kuat lekat terhadap baja tulangan dan beton. Kenaikan nilai kuat lekat dengan substitusi agregat limbah keramik dapat dikaitkan dengan peningkatan *interlocking* antara agregat kasar dan pasta dimana agregat limbah pecahan keramik memiliki aktivitas *pozzolanic* dan bentuk yang lebih bersudut dibandingkan agregat kasar alami.

Pembahasan Kehancuran Benda Uji

Kehancuran yang terjadi pada benda uji kuat lekat akibat *pull-out test* pada penelitian ini adalah berupa terjadinya *slip* sebesar 0,25 mm pada baja tulangan yang tertanam pada beton yang menyebabkan retakan kecil disekitar baja tulangan yang tertarik. Kehancuran benda uji kuat lekat dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Kehancuran beton pengujian kuat lekat

Pada Gambar 10 memperlihatkan bahwa setiap kadar variasi substitusi agregat limbah pecahan keramik mengalami bentuk kehancuran beton yang beragam.

Pembahasan Aplikasi Kuat Lekat Pada Struktur

Suatu beton yang memiliki kuat lekat tinggi mampu meminimalisir potensi terjadinya keruntuhan balok secara menyeluruh. Lekatan antara beton dan tulangan dibentuk oleh *interlocking* dimana memiliki peran paling penting terhadap beton yang menyelimuti baja tulangan ulir agar tidak cepat mengalami keruntuhan total seketika saat terjadinya *slip*. Berdasarkan hasil pengujian kuat lekat beton variasi agregat limbah pecahan keramik pada penelitian ini, dengan penggunaan agregat limbah pecahan keramik sebagai bahan substitusi agregat kasar terbukti menghasilkan kenaikan nilai kuat lekat beton karena memiliki reaksi *pozzolanic* sebagai *chemical anchorage* dan bentuk agregat yang lebih bersudut sebagai *physical anchorage* sehingga terjadi peningkatan *interlocking* antara agregat kasar dan pasta pada beton.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini maka didapatkan data dari pengujian kuat lekat pada beton menggunakan metakaolin 12,5% dan variasi agregat limbah pecahan keramik yang kemudian diolah dan dihasilkan kesimpulan-kesimpulan:

1. Menurut hasil pengujian parameter workabilitas beton SCC pada beton segar dan uji kuat tekan, substitusi semen dengan menggunakan metakaolin 12,5% dan variasi agregat limbah pecahan keramik 0 – 40% memberikan hasil yang sesuai syarat dengan karakteristik beton segar SCC dan nilai kuat tekan maksimum 63,03 MPa, sehingga memenuhi syarat kriteria beton mutu tinggi memadat mandiri.
2. Menurut hasil uji kuat lekat beton HSSCC (*High Strength Self-Compacting Concrete*), variasi kadar agregat limbah pecahan keramik berpengaruh terhadap kuat lekat beton. Penambahan kadar agregat limbah pecahan keramik 20% ; 30% ; dan 40% mengalami kenaikan nilai secara berturut-turut 8,03 MPa; 7,56 MPa; dan 5,73 MPa dari beton kadar agregat limbah pecahan keramik 0% dengan nilai 5,14 MPa.

REKOMENDASI

Berdasarkan kendala-kendala yang terjadi saat melakukan penelitian ini, diharapkan dalam penelitian selanjutnya mampu dilakukan dengan lebih baik. Sehingga berikut merupakan beberapa saran yang diharapkan dapat menyokong pelaksanaan penelitian berikutnya menjadi lebih baik dan berjalan lancar yaitu:

1. Penelitian dilanjutkan untuk mengetahui nilai kuat lekat dengan menggunakan berbagai diameter baja tulangan.
2. Penelitian dilanjutkan untuk mengetahui peningkatan atau penurunan yang terjadi terkait nilai kuat lekat beton HSSCC menggunakan agregat limbah pecahan keramik pada berbagai variasi umur beton sesuai yang tertera dalam SNI.

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala ucap puji beserta syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat-Nya yang telah diberikan, sehingga dapat terselesaikannya jurnal ini. Tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, terjadinya berbagai kendala yang dihadapi dari pelaksanaan penelitian hingga terselesaikannya penulisan jurnal ini mampu dilewati. Semoga keberadaan jurnal ini mampu memberikan manfaat berupa ilmu khususnya bagi para mahasiswa teknik sipil.

REFERENSI

- American Society for Testing and Material, 1991, "ASTM C-234-91a : Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel".
- 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.
- Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik, 1971, "Peraturan Beton Bertulang Indonesia".
- Lee, B.X., Kjaerulf, F., Turner, S., Cohen, L., Donnelly, P.D., Muggah, R., Davis, R., Realini, A., Kieselbach, B., MacGregor, L.S. and Waller, I., 2016. Transforming our world: implementing the 2030 agenda through sustainable development goal indicators. *Journal of public health policy*, 37(1), pp.13-31.
- 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.
- Passos L., Júnior A, Fernandes B & Costa C, 2019, "Bond Between Steel and Concrete Made With Ceramic Waste Aggregate", *Revista Escola de Minas International Engineering Journal*. Vol. 72 No. 1, pp. 31-37.

- Raval, A.D., Patel, D.I.N. and Pitroda, P.J., 2013. Ceramic waste: Effective replacement of cement for establishing sustainable concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 4(6), pp.2324-2329.
- Standar Nasional Indonesia, 2002, "SNI 03-6468-2002 : Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi Dengan Semen Portland Dengan Abu Terbang".
- The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2005, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production, and Use".
- Widyawati, R., 2011, "Studi Kuat Tekan Beton Beragregat Ramah Lingkungan". *Jurnal Rekayasa*, Vol. 15 No. 3 Des, pp. 217-224.
- Winter G & Nilson A, 1993, "Perencanaan Struktur Beton Bertulang", Pradnya Paramitha. Jakarta.
- Zareei S, Ameri F, Bahrami N, Shoaee P, Muesaei H & F. N. (2019). "Green High Strength Concrete Containing Recycled Waste Ceramic Aggregates", *Journal of Building Engineering*. Vol. 26 Apr, pp. 1-13.