

METODE *PARTICLE PACKING* DAN REOLOGI BETON SEGAR *SELF COMPACTED CONCRETE (SCC)*

Margeritha Agustina Morib*, Owner Jacob, Edi Sokhi Halawa

Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Immanuel

Jl. Solo Km. 11,1, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

*Email: margerithaagustina@ukrimuniversity.ac.id

Abstrak

Komposisi agregat merupakan faktor yang mempengaruhi kemampuan alir dan kekuatan akhir Self Compacted Concrete (SCC). Particle packing adalah metode untuk memaksimalkan kepadatan padatan agregat dengan memanfaatkan keseluruhan rentang gradasi partikel penyusun beton. Factor granular (G) dikembangkan oleh Dreux Gorrise tahun 1979 digunakan sebagai dasar perancangan. Target berat SCC 2300 kg/m³ menggunakan superplasticizer (SP) sebanyak 1,8% dan fly ash 10% dari berat semen. Komposisi agregat halus : agregat kasar divariasikan dengan rasio 30:70; 35:65; 40:60; 45:55 dan 50:50. Agregat halus menggunakan pasir Kali Kuning dengan gradasi II sedangkan agregat kasar berasal dari Clereng dengan ukuran maksimum 10 mm. Studi reologi mengenai kemampuan aliran materi dalam kondisi cair saat respon yang ditunjukkan berupa aliran plastis dan bukan deformasi elastis ketika menerima gaya diaplikasikan pada beton segar. Pengujian dilakukan untuk mengukur kemampuan alir, mengisi ruangan dan melewati tulangan tanpa segregasi meliputi slump flow, V-funnel, L-box dan sieve segregation. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh variasi rasio memenuhi syarat kemampuan alir, kecepatan alir dan mampu melewati tulangan namun masih terjadi segregasi. Metode particle packing dapat digunakan untuk perancangan SCC namun perlu komposisi filler dan SP yang tepat untuk mencegah terjadinya segregasi pada beton.

Kata kunci: beton segar, mix design, particle packing, reologi, SCC

1. PENDAHULUAN

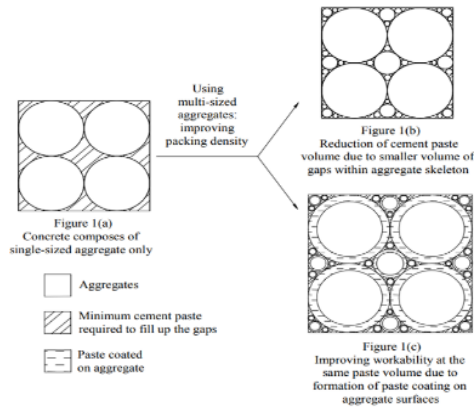
Compacting Concrete (SCC) merupakan jenis beton yang dirancang agar dapat mengalir serta memadat sendiri tanpa bantuan alat penggetar beton, sehingga seluruh cetakan terisi penuh saat dilakukan pengecoran. SCC pertama kali dikembangkan di Jepang dengan rancangan prototipe lengkap berhasil dibuat pada tahun 1988 (Okamura and Ouchi, 2003). *Mix design* SCC dirancang dengan mempertimbangkan karakteristik agregat untuk menghasilkan beton mudah mengalir dengan tingkat kepadatan tinggi.

Pasta semen merupakan media alir agregat. Jumlah pasta harus cukup besar untuk membantu agregat mengalir. Volume pasta harus lebih besar dari volume rongga antar agregat agar seluruh partikel agregat terbungkus penuh dengan pasta dan terlumasi dengan baik. Proses ini meningkatkan fluiditas dan mengurangi gesekan antar partikel agregat yang berpotensi menghambat aliran. Rasio agregat kasar terhadap agregat halus perlu dikurangi sehingga partikel agregat kasar secara individu benar-benar terbungkus oleh mortar. Hal ini mengurangi saling tautan antar agregat (*aggregate interlock*) dan meningkatkan *passing ability* saat beton mengalir melalui rintangan tulangan yang rapat (ENFARC, 2005).

Self

Kepadatan partikel agregat (*aggregate packing density*) merupakan metode perancangan campuran beton yang dikembangkan oleh Dreux Gorrise pada tahun 1979 (Fadliansyah and Saelan, 2023). Konsep kepadatan pengepakan agregat yaitu rasio volume padatan terhadap volume sebagian besar partikel padat. Konsep ini berperan penting dalam mendesain campuran karena meningkatnya kesadaran bahwa memaksimalkan kepadatan pengepakan dengan menyesuaikan gradasi seluruh rentang partikel padat termasuk agregat halus dan bahan semen dapat meningkatkan kinerja campuran secara keseluruhan (Wong and Kwan, 2005). Konsep *particle packing* diperlihatkan pada Gambar 1.

Penggunaan *packing density* mampu menghasilkan beton dengan karakteristik teknis tinggi namun perlu dimodifikasi dan diteliti kembali agar kinerja beton segar yaitu kemampuan alir (*flowability*), kepadatan (*compactibility*), dan stabilitas (*stability*) terhadap segregasi dan *bleeding* juga meningkat. *Packing density* yang semakin tinggi menghasilkan *slump flow* tinggi (Nimodiya and Patel, 2018).



Gambar 1. Particle packing (Wong dan Kwang, 2005)

Pasta semen sebagai perekat dan media alir menggunakan semen dan *fly ash* sebagai *filler*. Penggunaan *water powder ratio* rendah dengan tambahan *superplasticizer* dapat meningkatkan workabilitas beton dengan tetap menjaga konsistensi beton. Penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen sampai 11% masih menunjukkan kuat tekan beton yang terus meningkat (Morib, Laowo and Hulu, 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan rancangan campuran yang baik dengan cara menggabungkan metode *particle packing* dan persyaratan beton SCC sehingga diperoleh beton dengan kinerja (*flowability, filing ability, viscosity*) tinggi pada kondisi segar.

2. METODOLOGI

2.1. Particle Packing

Metode *particle packing* merupakan pendekatan yang digunakan untuk mengoptimalkan distribusi partikel dalam campuran beton dengan tujuan mencapai kepadatan dan kekuatan optimal. Rancangan campuran menggunakan factor granular (G) menurut Dreux Grosse disajikan pada Tabel. 1.

Tabel 1
Faktor granular menurut Dreux Grosse

Kualitas Agregat	Diameter Agregat Kasar		
	D < 16	25 < D < 40	D ≥ 63
Baik Sekali	0,55	0,60	0,65
Normal	0,45	0,50	0,55
Dapat Dipakai	0,35	0,40	0,45

*sumber (Muhammad Nurdin and Saellan, 2017)

Gradasi agregat yang baik dapat menghasilkan rongga minimum sehingga kepadatan agregat (*packing density*) berada pada nilai maksimum (Fadliansyah and Saellan, 2023).

Pada campuran beton, nilai *packing density* diambil dari modulus halus agregat gabungan. Modulus halus agregat gabungan (MHB) yang ditulis pada Persamaan 1.

$$MHB_g = (\%A_k \times MHB_{Ak}) + (\%A_h \times MHB_{Ah}) \quad (1)$$

Dengan:

MHB_g : Modulus Halus Butir Gabungan

A_k : Agregat kasar (kerikil)

A_h : Agregat halus (pasir)

Persen lolos ayakan untuk mendapatkan nilai Modulus Halus Butir (MHB) optimum dihitung berdasarkan Persamaan 2:

$$P_d = \left(\frac{d^q - d^{q_{min}}}{d^q - d^{q_{max}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Dengan:

P_d : Persen lolos ayakan dengan ukuran d (%)

d : ukuran agregat yang diperiksa (mm)

q : 0,37

Perhitungan gradasi agregat yang menghasilkan kepadatan maksimum yang telah disesuaikan dengan ukuran ayakan disajikan pada Tabel 2. Jika MHB gabungan dan MHB optimum diketahui, maka nilai *Packing Density* (PD) yang terjadi dapat dihitung menggunakan Persamaan 3 dan 4.

Tabel 2
Modulus Halus Butir (MHB) optimum

UKURAN SARINGAN	PERSEN LOLOS AYAKAN (%)	BERAT TERTAHAN KUMULATI F (%)
9,5	100,00	0,00
4,75	71,17	28,83
2	44,15	55,85
1,18	31,45	68,55
0,8	23,56	76,44
0,3	8,03	91,97
0,15	0,00	100,00
TOTAL		421,64
	MHB OPTIMUM	4,216

*hasil analisis

Jika $MHB_{gabungan} > MHB_{optimum}$, maka

$$PD = \frac{MHB_{optimum}}{MHB_{gabungan}} \times K \times G \quad (3)$$

Jika $MHB_{gabungan} < MHB_{optimum}$, maka

$$PD = \frac{MHB \text{ gabungan}}{MHB \text{ optimum}} \times K \times FG \quad (4)$$

Dengan:

G : nilai faktor granular

Va : Volume agregat

K = 1 jika $0,65 \text{ m}^3 \leq Va \leq 0,70 \text{ m}^3$

K = $\frac{Va}{0,65}$ jika $Va \leq 0,65 \text{ m}^3$

K = $\frac{0,65}{Va}$ jika $Va > 0,70 \text{ m}^3$ dan MHB gabungan \geq MHB optimum

K = $\frac{0,7}{Va}$ jika $0,70 \text{ m}^3 < Va \leq 0,73 \text{ m}^3$ dan MHB gabungan $<$ MHB optimum

2.2 Mix Design SCC

Mix design SCC direncanakan berdasarkan data hasil uji karakteristik material penyusunnya yaitu semen, fly ash, superplasticizer, air pasir dan kerikil. Target berat beton 2300 kg/m³, menggunakan water powder ratio 0,4. Fly ash untuk substitusi parsial semen sebanyak 10% dan superplasticizer 1,8% dari berat semen. Perancangan menggunakan MS-Excel menggunakan metode particle packing dengan variasi komposisi agregat halus : agregat kasar yaitu 30:70; 35:65; 40:60; 45:55; 50:50. Proses pembuatan mix design pada software MS Excel disajikan pada Gambar 2.

PERHITUNGAN PERANCANGAN				PERHITUNGAN PACKING DENSITY OPTIMUM			
% fly ash terhadap berat semen	10 %			Total volume agregat	0,689	m ³	
% Superplasticizer terhadap berat semen	1,8 %			V agregat halus thd	0,281		
	30 %			total agregat	1,000		
% agregat halus terhadap agregat gabungan	40 %			Nilai K	0,600	Tabel 1	
	45 %			Packing density opt	0,416		
	50 %			Packing density (Pd)	0,416		
	50 %			Berat jenis agregat gabungan	2,542		
Target berat beton	2300 kg/m ³			Berat agregat target	1057,849	kg/m ³	
PERHITUNGAN MODULUS HALUS BISTAR AGREGAT GABUNGAN				Modifikasi rancangan berdasarkan hasil Packing Density Optimum			
% FASIR	% KERIKIL	MHB GABUNGAN	MHB OPTIMUM	MAKSIKUM	BERAT (kg)	VOLUME (m ³)	
30	70	638	4216	Agregat gabungan	1057,849	0,117	
35	65	636	4216	Agregat halus	317,355	0,117	
40	60	634	4216	Agregat kasar	740,494	0,300	
45	55	632	4216				
50	50	630	4216				
PROSEDUR PERANCANGAN				MATERIAL			
Berat agregat halus, agregat kasar	30 : 70			Pasir	1242,151	0,506	
Semen	396,812	0,126		Semen	818,282	0,260	
FLY ASH	39,681	0,013		Fly ash	81,828	0,031	
Superplasticizer	7,145	0,003		Super plasticizer	14,279	0,006	
air	134,776	0,159		Air	327,533	0,327	
Agregat halus	309,189	0,188		T O T A L	2300,000	1,041	
Agregat kasar	1168,533	0,461		Volume solid beton	104,139	%	
T O T A L	2300,000	0,972		Volume rongga	-3,139	%	
				Rasio agregat semen	1,299		

Gambar 2 Prosedur mix design menggunakan MS-Excel

2.3 Uji karakteristik SCC

Karakteristik teknis SCC ditentukan berdasarkan reology beton segar sesuai EFNARC 2005 untuk mengetahui kelas SCC. Reology merupakan studi mengenai aliran materi terutama dalam kondisi cair, bisa juga benda padat atau semi padat ketika respon yang ditunjukkan berupa aliran plastis bukan deformasi elastis ketika menerima gaya (Schowalter, 1978). Pengujian reology untuk mengukur kemampuan beton pada kondisi segar setelah pengadukan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Pengujian reology beton segar

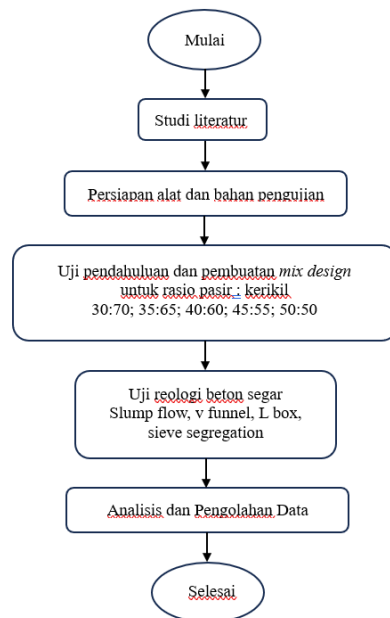
Pengukuran aliran untuk	Metode Pengujian	EFNARC 2005	Kelas SCC
Mengisi ruangan	Slump flow	550 - 850 mm	SF1/ SF2
Melewati tulangan	L-box	0,8	PA1/ PA2
Viskositas	V-funnel	8 - 25 detik	VF1/ VF2
Ketahanan segregasi	Sieve segregation	15% - 20%	SR1/ SR2

2.4 Obyek Penelitian

Reology beton segar diuji pada beton sesaat setelah selesai proses pengadukan. Untuk setiap variasi komposisi campuran dilakukan pengujian dengan metode slump flow, L-box, V-funnel dan sieve segregation.

2.5 Diagram alir penelitian

Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil uji karakteristik material

Uji pendahuluan diperlukan untuk membuat mix design. Pengujian mencakup uji kadar lumpur, berat satuan, berat jenis, penyerapan air, gradasi, dan MHB. Hasil uji pendahuluan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4
Hasil uji karakteristik material

Pengujian	Hasil
<i>Agregat Halus</i>	
Kadar lumpur (%)	2,19
Berat satuan (kg/m ³)	1482
Berat jenis	2,71
Penyerapan (%)	1,42
Gradasi	II
MHB	2,78
<i>Agregat Kasar</i>	
Kadar lumpur (%)	3,803
Berat satuan (kg/m ³)	1336
Berat jenis	2,47
Penyerapan (%)	2,093
Gradasi	max 10 mm
MHB	6,208
<i>Fly ash</i>	
Berat jenis	2,63
<i>Superplasticizer</i>	
Berat jenis	2,34

*Hasil analisis

3.2 Hasil rancangan campuran

Penggunaan variasi rasio pasir dan kerikil mempengaruhi berat dan volume material dimana jumlah penggunaan pasir sebanding dengan berat dan volume material lain seperti semen, *fly ash* (FA), *superplasticizer* (SP), dan air. Semakin besar volume pasir dalam campuran menurunkan berat dan volume kerikil serta pasta secara keseluruhan. Hasil rancangan campuran setiap rasio dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5
Hasil rancangan campuran

Material	Berat Material tiap 1 m ³ (kg)				
	30 : 70	35 : 65	40 : 60	45 : 55	50 : 50
Semen	818,28	812,52	806,72	800,87	794,99
FA	81,83	81,25	80,67	80,09	79,50
SP	14,73	14,62	14,52	14,42	14,31
Air	327,31	325,00	322,69	320,35	317,99
pasir	317,35	373,31	430,16	487,92	546,60
kerikil	740,49	693,28	645,24	596,35	546,60
TOTAL	2300	2300	2300	2300	2300

3.3 Hasil reology beton segar

Pengujian reologi beton segar meliputi pengujian ketahanan terhadap segregasi, *slump flow*, *L-box* dan *V funnel*. Pengujian *segregation resistance* disajikan pada Gambar 4, pengujian

slump flow disajikan pada Gambar 5, pengujian *V funnel* disajikan pada Gambar 6 dan pengujian *L box* disajikan pada Gambar 7.



Gambar 4. Pengujian *sieve segregation*



Gambar 5. Pengujian *slump flow*



Gambar 6. Pengujian *V funnel*



Gambar 7. Pengujian *L-box*

Hasil uji segregasi menunjukkan bahwa tidak ada satupun dari perbandingan rasio yang memberikan hasil *segregation resistance* lebih kecil atau sama dengan 20%, artinya belum memenuhi syarat ketahanan terhadap segregasi. Hasil pengujian *sieve segregation* dapat dilihat pada Tabel 6. Untuk mengatasi hal tersebut perlu penambahan volume pasta dan volume mortar dalam SCC. Selain itu pengurangan *water powder ratio* dan komposisi *fly ash* serta *filler* yang tepat perlu disesuaikan untuk mendapatkan konsistensi yang baik dari SCC. Hasil uji agregat halus berada pada gradasi II yaitu pasir agak kasar. Penggunaan agregat halus gradasi IV memberikan hasil *sieve segregation* yang memenuhi syarat (Morib, Zai and Ariyani, 2024).

Tabel 6
Hasil Pengujian Sieve Segregation

Hasil uji	Rasio pasir : kerikil				
	30 : 70	35 : 65	40 : 60	45 : 55	50 : 50
SR (%)	35,23	30,99	41,62	29,74	41,91
Kelas SCC	TM	TM	TM	TM	TM

*TM : tidak memenuhi

Tabel 7 menunjukkan bahwa beton segar memenuhi kriteria SCC yaitu SF 1 pada rasio 30 : 70 dan 40 : 60 sehingga dapat direkomendasi untuk pengecoran plat lantai bangunan dan pengecoran dengan sistem injeksi. Rasio pasir dan kerikil 35 : 65; 45 : 55 dan 50 : 50 memenuhi kriteria SF 2 dan direkomendasi untuk digunakan pada konstruksi umum seperti kolom dan dinding.

Tabel 7
Hasil Pengujian Slump Flow

Hasil uji	Rasio pasir : kerikil				
	30 : 70	35 : 65	40 : 60	45 : 55	50 : 50
SF (mm)	645	722,5	642,5	672,5	708,3
Kelas SCC	SF1	SF2	SF1	SF2	SF2

Hasil pengujian *V-funnel* disajikan pada **Tabel 8**. *Flow time* pada beton segar semakin lambat seiring dengan peningkatan jumlah agregat halus sampai komposisi 40 : 60 kemudian meningkat lagi. Hasil uji tidak memenuhi syarat kekentalan/viskositas dari campuran beton. Waktu alir hasil uji *V-funnel* yang diharapkan antara 8 – 25 detik (ENFARC, 2005). Secara keseluruhan waktu aliran terlalu cepat dan menunjukkan bahwa campuran terlalu encer. Hal tersebut berkorelasi dengan hasil pengujian segregasi yaitu seluruh campuran tidak memenuhi hasil uji segregasi. Terjadinya campuran yang terlalu encer disebabkan karena jumlah pasta

terlalu besar, *water powder ratio* terlalu besar atau dosis *superplasticizer* yang terlalu besar. Untuk mengatasi hal tersebut, perlu penggunaan *viscosity modifying agent* (VMA) atau menggunakan *filler* dan pasir yang lebih halus.

Tabel 8
Hasil Pengujian V-Funnel

Hasil uji	Rasio pasir : kerikil				
	30 : 70	35 : 65	40 : 60	45 : 55	50 : 50
VF (detik)	2	3	4	3	2
Kelas SCC	TM	TM	TM	TM	TM

*TM : tidak memenuhi

Pengujian *L-box* dalam penelitian ini menggunakan sistem penghalang 3 batang tulangan. Hasil *passing ratio* dan *blocking ratio* disajikan pada **Tabel 9**. Peningkatan pasir dan berkurangnya kerikil pada campuran SCC menyebabkan *passing ratio* dari beton segar semakin meningkat.

Tabel 9
Hasil Pengujian L-Box

Hasil uji	Rasio pasir : kerikil				
	30 : 70	35 : 65	40 : 60	45 : 55	50 : 50
PR*	0,67	0,87	0,91	0,90	0,88
BR**	0,33	0,13	0,09	0,10	0,12
Kelas SCC	TM	PA2	PA2	PA2	PA2

*PR : *passing ratio*

**BR : *blocking ratio*

Passing ratio pada komposisi 30 : 70 tidak memenuhi syarat karena komposisi agregat kasar masih terlalu besar dibandingkan dengan agregat halus. *Blocking* pada SCC dapat diatasi dengan memperkecil dimensi maksimum agregat kasar dan meningkatkan komposisi pasta dan agregat halus dalam campuran.

Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh, campuran SCC hasil rancangan menggunakan metode *particle packing* masih perlu dilakukan penyesuaian untuk mendapatkan hasil yang diharapkan terutama *water powder ratio*, komposisi pasta dan dosis *superplasticizer* yang digunakan agar tidak terjadi segregasi pada campuran SCC.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

- Metode *particle packing* dapat digunakan untuk perancangan campuran SCC.

- b. Komposisi pasir dalam agregat campuran yang semakin meningkat, mengakibatkan jumlah agregat kasar dan jumlah pasta menurun. Peningkatan tersebut berdampak pada hasil pengujian kemampuan alir dan kemampuan melewati rintangan yang semakin meningkat pula.
- c. Hasil uji reologi beton segar menunjukkan bahwa campuran memenuhi syarat kemampuan alir dan kemampuan melewati rintangan tulangan namun terdapat kecenderungan segregasi pada campuran akibat kadar *superplasticizer* yang terlalu tinggi dan penggunaan agregat halus gradasi II.
- d. Perlu dilakukan penyesuaian kembali terhadap rancangan campuran untuk mendapatkan hasil reologi yang memenuhi keseluruhan syarat SCC.

Technology (IJCIET). Available at: <http://iaeme.com>

- Okamura, H. and Ouchi, M. (2003) *Self-Compacting Concrete*, *Journal of Advanced Concrete Technology*.
- Schowalter, W.R. (1978) 'Mechanics of non-Newtonian fluids.' Available at: <https://doi.org/10.1201/9781003417026-5>.
- Wong, H.H.C. and Kwan, A.K.H. (2005) *Packing density: a key concept for mix design of high performance concrete*, *Materials Science and Technology in Engineering Conference (MaSTEC) Hong Kong*.

DAFTAR PUSTAKA

- ENFARC (2005) *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use 'The European Guidelines for Self Compacting Concrete'*. Available at: www.efnarc.org.
- Fadliansyah, M.N. and Saelan, P. (2023) *Kajian mengenai Aplikasi Packing Density Agregat dalam Campuran Beton Cara SNI 03-2834-2000, FTSP Series*. Bandung.
- Morib, Laowo and Hulu (2021) 'Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton Mutu Tinggi Umur 3 Hari Menggunakan Material Hasil Pembakaran Sebagai Pengganti Sebagian Semen', *Prosiding CEEDRiMS2021* [Preprint]. Available at: <https://publikasiilmiah.ums.ac.id/xmlui/handle/11617/12686> (Accessed: 26 October 2023).
- Morib, M.A., Zai, H.F. and Ariyani, N. (2024) 'Perancangan Campuran Self Compacted Concrete Berdasarkan Kuat Tekan dan Aliran Mortar Maksimum Menggunakan Agregat Kering Udara', *Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), pp. 75–93. Available at: <https://doi.org/10.28932/jts.v20i1.6401>.
- Muhammad Nurdin, E. and Saelan, P. (2017) *Studi Lanjut Mengenai Faktor Granular Tinggi pada Perancangan Beton Cara Dreux Gorrise*. Bandung .
- Nimodiya, P.N. and Patel, H.S. (2018) *Effect of Packing Density On Properties of Self Compacting Concrete*, *International Journal of Civil Engineering and*