

BETON RENDAH SEMEN DENGAN KONSEP KEPADATAN PARTIKEL

Erianto Hardi¹, Ricky Darius Tandean² dan Antoni³

ABSTRAK : Pemakaian semen dipengaruhi antara lain oleh *particle packing* agregat, dimana semakin padat kombinasi partikel agregat dengan ukuran yang berbeda, maka pemakaian semen akan semakin minim. Secara teoritis, volume pasta (V_p) sepenuhnya mengisi volume *void* (V_v) di antara agregat dalam beton, atau (V_p/V_v) sebesar 100%. Namun tidak tertutup kemungkinan untuk meningkatkan rasio V_p/V_v pada campuran beton yang belum jadi. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan *mix design* yang memaksimalkan metode *particle packing* untuk meminimalkan pemakaian semen dengan mempertimbangkan rasio volume pasta dan volume *void* (V_p/V_v) serta pemakaian *superplasticizer* sebagai variabel yang menentukan *workability* beton.

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa pemakaian agregat kasar dengan ukuran yang beragam (*multi-sized*) menghasilkan *void ratio* terkecil sebesar 23.5% . Dengan metoda *particle packing*, perhitungan kebutuhan jumlah semen terendah secara teoritis berada pada w/c 0.5, yaitu sebesar 287 kg/m³. Namun setelah pengecoran, hasil yang didapatkan masih memiliki kebutuhan semen yang kurang lebih sama dengan penggunaan semen minimum pada beton konvensional (± 310 kg/m³). Pemakaian *superplasticizer* dapat menyebabkan terjadinya *bleeding* dan tidak meningkatkan *workability* beton dengan kadar semen yang rendah. Penggantian semen dengan *fly ash* sebesar 50% sebagai *binder* dapat meningkatkan *workability* beton dan mengurangi pemakaian semen hingga di bawah standar penggunaan semen minimum.

KATA KUNCI: *particle packing, void ratio, superplasticizer, V_p/V_v , workability, fly ash*

1. PENDAHULUAN

Pemakaian semen yang tinggi pada pembuatan beton menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan karena emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan oleh proses produksi semen dalam jumlah yang besar. Secara konvensional, beton memiliki persyaratan minimum pemakaian semen, yang ditinjau berdasarkan ukuran maksimum agregat yang digunakan (ACI Committee 302, 1997). Persyaratan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Proporsi Semen Minimum Berdasarkan Ukuran Maksimum Agregat yang Digunakan (ACI Committee 302, 1997)

<i>Nominal maximum size of aggregate, mm</i>	<i>Cementitious content, kg/m³</i>
37.5	280
25	310
19	320
12.5	350
9.5	360

Dalam penelitian ini akan dilakukan sebuah metoda yang disebut konsep kepadatan partikel (*particle packing*). *Particle Packing* bertujuan untuk mengombinasikan agregat-agregat dengan ukuran yang

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, erianto_h@yahoo.com

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, rickyandean@gmail.com

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, antoni@petra.ac.id

2.

berbeda-beda untuk mencapai kondisi yang padat, yang akan menyebabkan volume rongga kosong menjadi sekecil mungkin (Kwan & Wong, 2005). Jika agregat-agregat yang dicampurkan semakin padat, maka semakin rendah nilai *void ratio* yang dihasilkan. Hal ini akan menyebabkan jumlah pasta semen yang dibutuhkan juga akan berkurang. Penggantian semen dengan *fly ash* juga dapat menurunkan pemakaian semen karena *fly ash* bisa berfungsi sebagai pengikat (*binder*). *Fly ash* juga dapat meningkatkan *workability* pada beton karena memiliki bentuk partikel yang bulat dan lebih halus dari pada semen (Sankaralingam, Roy, & Pandev, 2010).

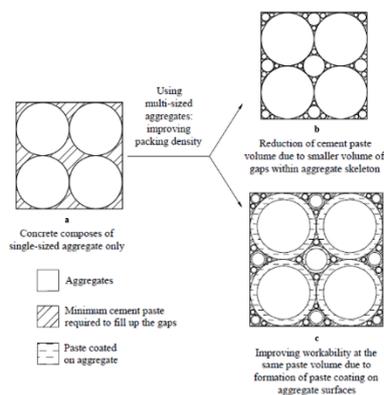
2. STUDI LITERATUR

2.1. Beton Rendah Semen

Beton rendah semen (*Low Cement Concrete* atau *LCC*) adalah beton yang memanfaatkan semen dengan jumlah yang sedikit. Dengan proporsi semen yang sedikit, retak (*crack*) pada beton akan berkurang karena susut (*shrinkage*) yang terjadi juga sedikit (Wassermann, Katz, & Bentur, 2009). Pemakaian bahan kimia pembantu (*admixture*) seperti *superplasticizer* mungkin tidak akan membantu meningkatkan *workability* pada beton dengan semen yang rendah (Yurdakul, 2010).

2.2. Kepadatan Partikel

Kepadatan partikel yang juga sering disebut sebagai *particle packing* menjelaskan hubungan antara partikel dalam mengisi rongga yang terdapat pada beton. Partikel yang dimaksud adalah agregat halus dan kasar yang akan mengisi rongga pada beton.. Pengertian *particle packing* diperlihatkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Particle Packing (Kwan & Wong, 2005)

3. METODA PENELITIAN

Dalam penelitian ini, hal pertama yang dilakukan adalah menganalisa *void ratio* pada kombinasi agregat kasar dan agregat halus. Untuk mencari nilai *void ratio* pada kombinasi agregat dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Tabel 2. Perhitungan Mencari Nilai Void Ratio (1)

Berat Tabung (g)	Berat Tabung + Kombinasi Agregat (g)	Berat Kombinasi Agregat (g)	Volume Kombinasi Agregat (cm ³)	Volume Tabung (cm ³)	Void Ratio (%)
W1	W2	W3	V1	V2	
W1	W2	W2 - W1	W3/(Gs. pasir x persentase pasir + Gs. agregat kasar x persentase agregat kasar)	V2	1-(V1/V2) x 100

Catatan:

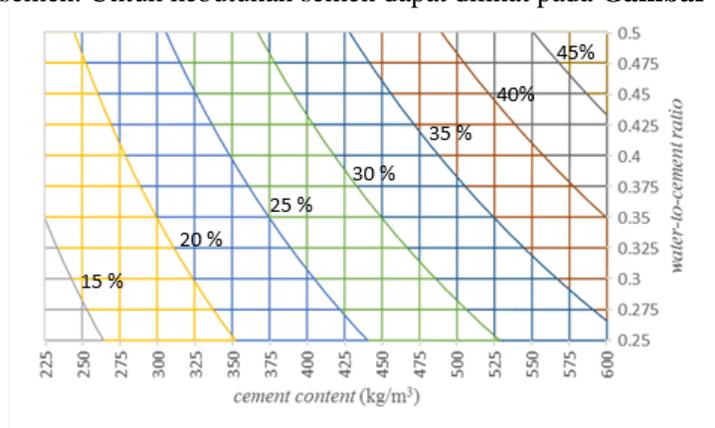
- Agregat Kasar dan Agregat Halus dalam keadaan SSD
- Gs (berat jenis) Agregat Kasar dan Agregat Halus dalam keadaan SSD

2.

Tabel 3. Perhitungan Mencari Nilai Void Ratio (2)

Berat Tabung + Kombinasi Agregat (g) W1	Berat Tabung + Kombinasi Agregat + Air (g) W2	Berat Air (g) W3	Volume Air (cm ³) V1	Volume Tabung (cm ³) V2	Void Ratio (%)
W1	W2	W2-W1	W3/(Gs Air)	V2	V1/V2 x 100

Setelah mendapatkan nilai *void ratio*, dilakukan analisa penggunaan jumlah semen terhadap *void ratio* yang didapatkan secara teoritis. Secara teoritis, volume pasta mengisi volume rongga. Pasta terdiri dari air dan semen sehingga variabel yang berperan adalah faktor air-semen (w/c) dalam menentukan penggunaan jumlah semen. Untuk kebutuhan semen dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Grafik Kebutuhan Semen berdasarkan w/c dan Volume Rongga secara Teoritis

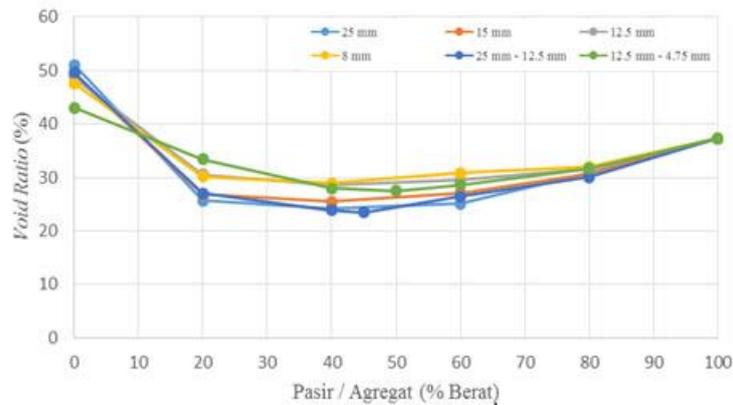
Untuk komposisi campuran beton yang pertama dilakukan analisa komposisi campuran beton dengan variasi w/c. Variabel yang berperan dalam komposisi campuran beton adalah rasio volume pasta terhadap volume rongga pada agregat (V_p/V_v) dan penggunaan *superplasticizer*. Berdasarkan teoritis, volume pasta mengisi volume rongga dengan persentase 100%, namun ada kemungkinan terjadinya penambahan pasta akibat pencampuran beton yang masih belum tercampur dengan baik (terlihat kering). Pada komposisi campuran beton yang kedua dilakukan analisa penambahan V_p/V_v dan kontrol *superplasticizer* pada ukuran maksimum agregat yang berbeda terhadap *workability* beton. Pada komposisi campuran beton yang ketiga dilakukan analisa pengaruh penggantian semen dengan *fly ash* terhadap *workability* beton. *Fly ash* yang digunakan merupakan *fly ash* tipe C dari PLTU Paiton, Jawa Timur, Indonesia dan semen yang digunakan adalah semen PPC (*Portland Pozzolan Cement*) yang diproduksi oleh PT. Semen Gresik.

4. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Analisa Void Ratio pada Agregat Kasar dan Halus

Material yang digunakan dalam analisa adalah agregat kasar dengan berbagai ukuran (25 mm, 15 mm, 12.5 mm, 8 mm, 25 mm–12.5 mm, dan 12.5 mm–4.75 mm) dan pasir Lumajang. **Gambar 3** menunjukkan perbandingan nilai *void ratio* dari ukuran agregat maksimum yang berbeda-beda dengan persentase kombinasi agregat kasar dan agregat halus. Hasil yang didapatkan adalah semakin besar ukuran agregat kasar yang digunakan, menghasilkan kombinasi yang lebih padat. Kondisi terpadat tercapai rata-rata pada kombinasi perbandingan massa yang mendekati persentase agregat kasar 60% dan agregat halus 40%. Untuk nilai *void ratio* terkecil tercapai dengan menggunakan agregat kasar dengan ukuran yang beragam (25 mm–12.5 mm) dengan memperoleh nilai *void ratio* sebesar 23.5% dengan persentase massa 45% agregat halus dan 55% agregat kasar.

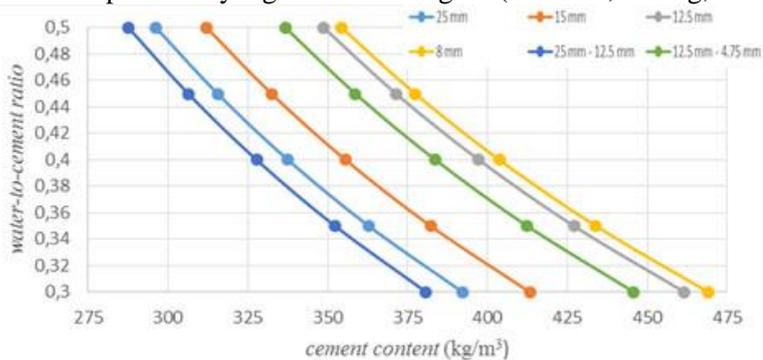
2.



Gambar 3. Perbandingan Kombinasi Agregat Kasar dan Agregat Halus

4.2. Hasil Analisa Kebutuhan Semen terhadap Void Ratio Secara Teoritis

Pada Gambar 4, kebutuhan semen yang paling minimum diperoleh bila menggunakan agregat kasar berukuran 25 mm–12.5 mm, yaitu dengan kebutuhan semen 287 kg/m³ pada w/c 0.5. Kebutuhan semen ini cukup rendah jika dibandingkan dengan persyaratan kadar semen minimum menurut ACI Committee 302 (1997), yaitu 310 kg/m³ untuk agregat dengan ukuran maksimum 25 mm. Namun kebutuhan semen tersebut hanya secara teoritis diperoleh pada nilai w/c yang cukup tinggi, sehingga akan mengurangi kekuatan tekan beton karena porositas yang makin meningkat (Mindess, Young, & Darwin, 2003).



Gambar 4. Kebutuhan Semen berdasarkan w/c dan Volume Rongga yang didapatkan secara Teoritis

4.3. Hasil Analisa Penggunaan Jumlah Semen Terhadap Variasi W/C pada Beton

Dengan hasil analisa kebutuhan pasta terhadap volume rongga yang didapatkan secara teoritis, ditentukan komposisi campuran beton pada Tabel 4.

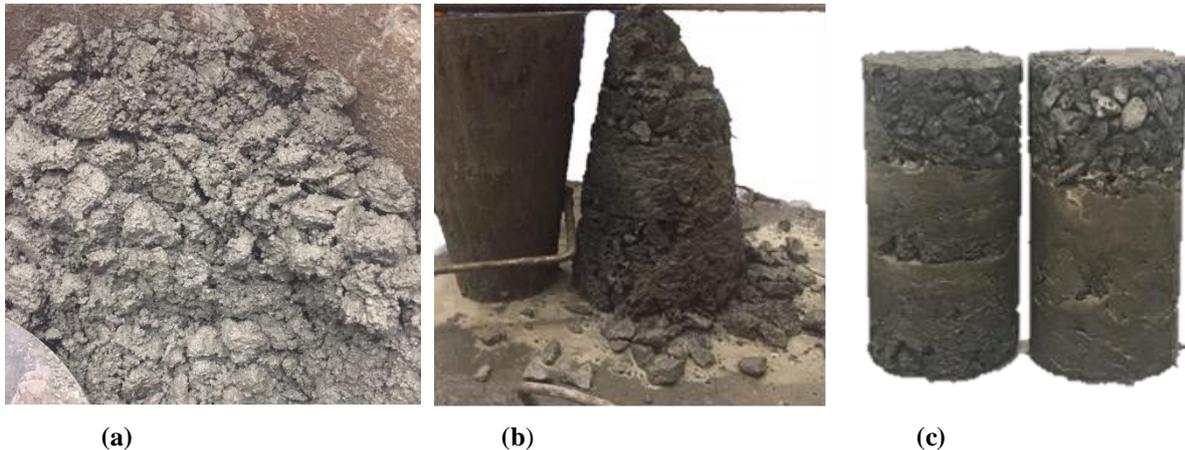
Tabel 4. Komposisi Campuran Beton (1)

Ukuran Agregat Kasar (mm)	Kode	Semen (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	w/c	Agg. Halus (kg/m ³)	Agg. Kasar (kg/m ³)	V _p /V _v (%)
25 – 12.5	T1	287	144	0.50	950	1127	100
	T2	328	131	0.40	950	1127	100
	T3	352	123	0.35	950	1127	100
	T4	381	114	0.30	950	1127	100

Pada saat proses pengecoran, kontrol kadar pasta dan *superplasticizer* dilakukan agar beton segar dapat tercampur dengan baik dan dapat menghindarkan terjadinya *bleeding* dan segregasi akibat penggunaan *superplasticizer* yang berlebihan. Pada beton segar dengan w/c 0.5, penggunaan pasta dengan rasio V_p/V_v 100% belum menunjukkan tanda-tanda terjadinya proses pencampuran beton yang baik. Peneliti menduga kurangnya air pada campuran beton segar, seperti yang terlihat pada Gambar 5(a). Dengan menambahkan air, mutu beton akan berkurang sehingga peneliti menambahkan *superplasticizer* sebesar 0.2% dari berat semen, namun yang terjadi adalah *bleeding* dan segregasi serta menghasilkan beton yang

2.

tidak *workable* ($\text{slump} = 0$). Hasil yang didapatkan ini mirip dengan percobaan yang dilakukan oleh Yurdakul (2010). Dengan penggunaan semen yang rendah dengan w/c 0.4 dan menggunakan *water reducing agent*, hasil *slump* yang didapatkan juga nol sehingga Yurdakul (2010) menyimpulkan ada kemungkinan bahwa penambahan *water reducing agent* tidak meningkatkan *workability* pada beton dengan semen yang rendah. Hasil tersebut diperlihatkan pada **Gambar 5(b)**. Dari hasil percobaan tersebut, peneliti mengindikasikan bahwa kontrol pemakaian *superplasticizer* sangatlah sulit untuk dilakukan pada beton dengan semen yang rendah ($<310 \text{ kg/m}^3$) sesuai ketentuan ACI Committee 302 (1997) untuk ukuran agregat maksimum 25 mm. Selain itu, Yurdakul (2010) mengatakan bahwa penggunaan semen yang rendah dengan dosis *water reducing agent* yang tinggi hanya akan mengurangi *cohesiveness* dari beton segar dan menyebabkan *honeycombing*. Hasil beton yang dicetak dapat dilihat pada **Gambar 5(c)**. Selain itu, peneliti juga menduga bahwa *bleeding* dipengaruhi oleh penambahan *superplasticizer* secara langsung tanpa bertahap. Dengan penambahan *superplasticizer* secara bertahap, resiko terjadinya *bleeding* pada beton segar dapat diminimalisir. Lalu, peneliti mencoba menambahkan volume pasta terhadap volume rongga (V_p/V_v) sebesar 10% menjadi 110%. Beton segar yang dihasilkan nampak tercampur dengan baik, walaupun *slump* yang dihasilkan masih rendah, sehingga tidak *workable*. Hasil pengujian *slump* beton diperlihatkan pada **Gambar 6**. Dari hasil percobaan tersebut, peneliti mengindikasikan bahwa penambahan V_p/V_v dapat meningkatkan *workability* beton segar. Namun, dengan penambahan V_p/V_v , penggunaan semen meningkat dan komposisi campuran beton berubah, sehingga diperlukan faktor koreksi untuk komposisi campurannya.



Gambar 5. Hasil Pencampuran Beton dengan w/c 0.5 dan V_p/V_v 100% (a) Hasil Pencampuran Beton dengan w/c 0.5, V_p/V_v 100%, dan SP 0.2 % (b) Hasil Cetakan Beton dengan w/c 0.5, V_p/V_v 100%, dan SP 0.2 % (c)



Gambar 6. Hasil Pengukuran Slump Beton dengan w/c 0.5 dan V_p/V_v 110 %

Pada w/c 0.4, 0.35, dan 0.3, penambahan *superplasticizer* dan V_p/V_v dilakukan secara perlahan sampai beton segar telah tercampur dengan baik. Hasil *mix design* aktual setelah penambahan *superplasticizer* dan V_p/V_v pada **Tabel 5**. Pada **Tabel 5**, penggunaan semen pada w/c 0.5 mendekati standar semen

minimum yang direkomendasikan oleh ACI Committee 302 (1997). Pemakaian *superplasticizer* juga dibatasi untuk menghindari *bleeding*. Hasil *slump* yang didapatkan juga masih rendah, yaitu dibawah 8 ± 2 cm. Terlihat juga pada **Tabel 5**, dengan w/c 0.3, penambahan *superplasticizer* kurang berpengaruh terhadap *workability* beton jika dibandingkan dengan w/c 0.35. Pada percobaan ini, pemakaian *superplasticizer* tidak bisa maksimal dikarenakan resiko *bleeding* tersebut.

Tabel 5. Hasil Komposisi Campuran Beton Aktual (1)

Kode	Semen (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	w/c	Agg. Halus (kg/m ³)	Agg. Kasar (kg/m ³)	Vp/Vv (%)	SP (% Semen)	Slump (cm)
T1	309	154	0.50	928	1101	110	0	1.0
T2	328	131	0.40	950	1127	100	0.066	2.5
T3	385	135	0.35	923	1095	112.5	0.253	4.0
T4	409	123	0.30	928	1101	110	0.328	0.0

4.4. Hasil Analisa Penambahan Vp/Vv dan Superplasticizer pada Penggunaan Ukuran Maksimum Agregat yang Berbeda Terhadap Workability Beton

Untuk analisa penambahan Vp/Vv dan *superplasticizer* pada penggunaan ukuran maksimum agregat yang berbeda terhadap *workability* beton, digunakan komposisi campuran beton pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Komposisi Campuran Beton dengan Ukuran Maksimum Agregat yang Berbeda (2)

Ukuran Agregat Kasar (mm)	Kode	Semen (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	w/c	Agg. Halus (kg/m ³)	Agg. Kasar (kg/m ³)	Vp/Vv (%)
25 – 12.5	A1	402	141	0.35	909	1079	119
	A2	416	145	0.35	897	1064	125
	A3	429	150	0.35	885	1050	131
12.5 – 4.75	B1	418	146	0.35	995	916	102
	B2	432	151	0.35	981	904	107
	B3	445	156	0.35	968	892	112

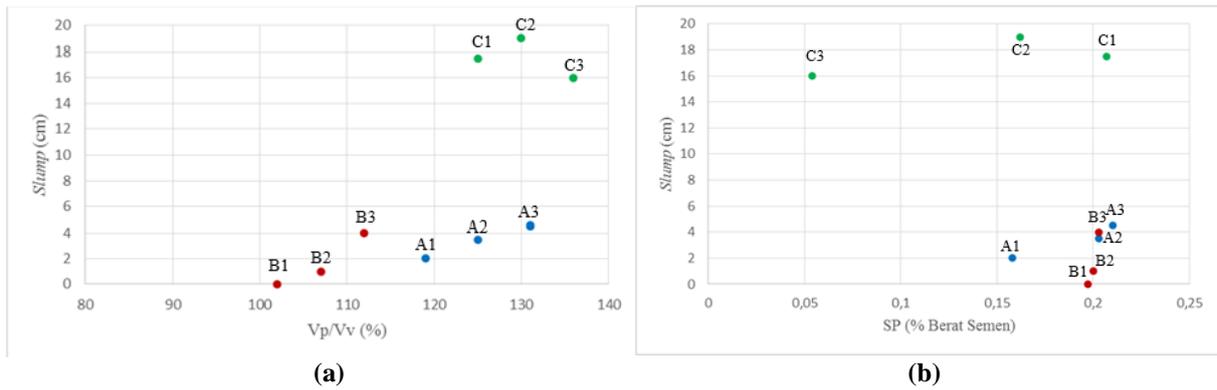
Dilakukan juga analisa penambahan Vp/Vv pada beton dengan *fly ash* 50% (*High Volume Fly Ash* atau *HVFA*) dikarenakan penggunaan semen yang masih tinggi pada komposisi campuran beton dengan w/b 0.35. Yang dimaksud dengan w/b adalah perbandingan massa air dengan *binder*, yaitu kombinasi semen dengan *fly ash*. Komposisi campuran beton dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7 Komposisi Campuran Beton (3)

Ukuran Agregat Kasar (mm)	Kode	Semen (kg/m ³)	Fly Ash (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	w/b	Agg. Halus (kg/m ³)	Agg. Kasar (kg/m ³)	Vp/Vv (%)
25 – 12.5	C1	198	198	139	0.35	897	1064	125
	C2	205	205	144	0.35	887	1052	130
	C3	212	212	148	0.35	876	1039	136

Dari hasil pengecoran, pada **Gambar 7(a)** terlihat bahwa *workability* beton dengan ukuran agregat maksimum yang lebih kecil rendah meskipun memakai kebutuhan semen yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan semen yang dipakai oleh beton dengan ukuran agregat kasar 25 mm–12.5 mm. Dengan menggantikan semen sebesar 50% dengan *fly ash*, *workability* pada beton meningkat pesat. Dapat dilihat pada **Gambar 7(a)** bahwa *slump* pada komposisi campuran beton dengan menggunakan *fly ash* 50% bisa mencapai lebih dari 15 cm, sehingga pada saat penambahan Vp/Vv, pemakaian *superplasticizer* dikurangi (**Gambar 7(b)**). Penambahan *superplasticizer* pada saat pengecoran dilakukan secara bertahap hingga campuran beton tercampur dengan baik.

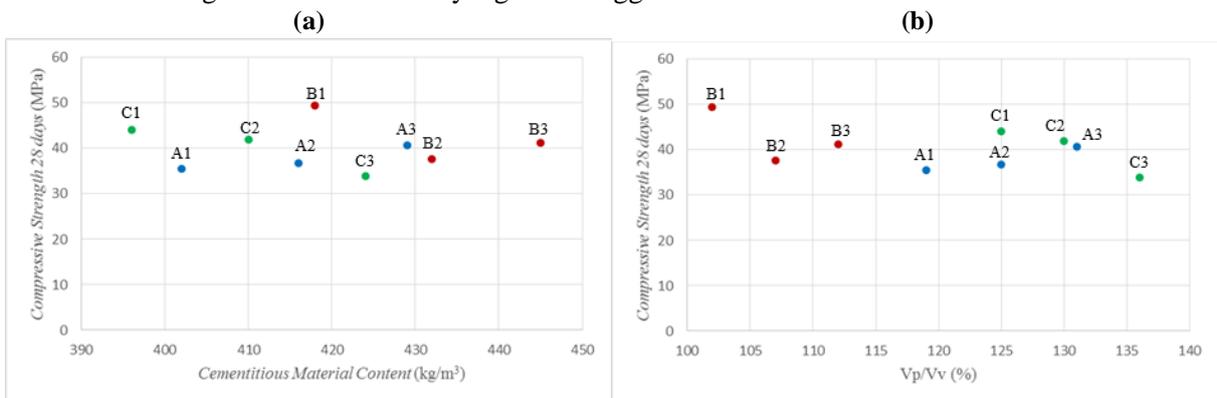
2.



Gambar 7. Hubungan Vp/Vv dan Slump (a) Hubungan SP dan Slump (b)

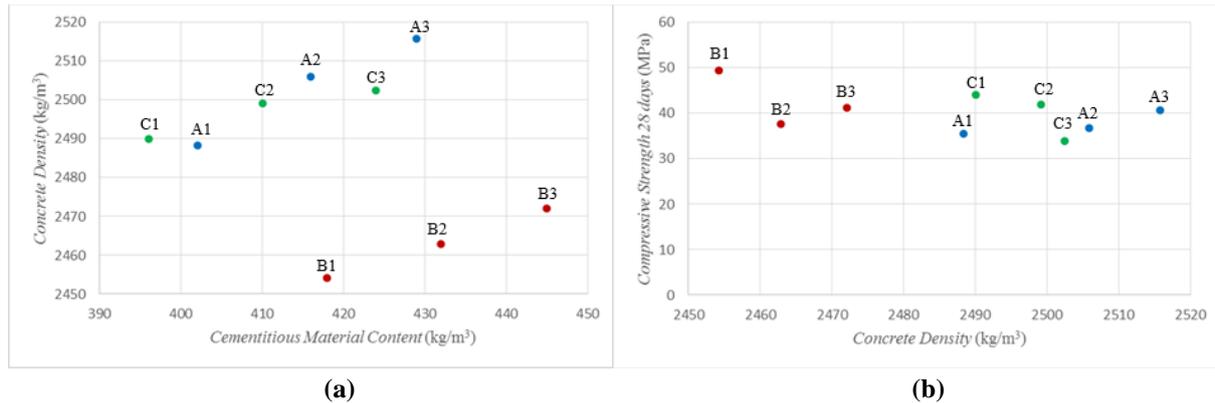
4.5. Hasil Kuat Tekan

Pada Gambar 9(a) dan Gambar 9(b) terlihat bahwa semakin tinggi penggunaan *cementitious material* dan Vp/Vv, maka semakin tinggi kuat tekan beton untuk agregat dengan ukuran 25 mm-12.5 mm dengan penggunaan 100% semen (sampel A). Untuk penggantian semen dengan *fly ash* 50% (sampel C), semakin tinggi penggunaan *cementitious material* dan Vp/Vv maka kuat tekan yang dihasilkan juga semakin rendah. Selain itu, dengan penggantian semen dengan *fly ash* 50% dapat menurunkan kebutuhan semen hingga di bawah standar penggunaan semen minimum yang direkomendasikan oleh ACI Committee 302 (1997) dan kuat tekan tertinggi yang dihasilkan adalah 44.14 MPa dengan *mix design* w/c 0.35 dan penggunaan semen sebesar 198 kg/m³ dan *fly ash* 198 kg/m³. Jika dibandingkan dengan penggunaan semen 100% dengan ukuran agregat yang sama, hasil kuat tekan yang dihasilkan oleh *mix design* dengan menggantikan semen dengan *fly ash* 50% lebih tinggi (44.14 MPa) dibandingkan dengan *mix design* dengan penggunaan semen 100% (40.74 MPa). Pada penggunaan ukuran agregat 12.5mm-4.75 mm (sampel B), terlihat tidak adanya hubungan antara penambahan *cementitious material* dan Vp/Vv terhadap kuat tekan yang dihasilkan. Hal ini memungkinkan bahwa dengan penambahan *cementitious material* dan Vp/Vv belum tentu menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Pada Gambar 10(a) dapat dilihat bahwa dengan penambahan *cementitious material*, berat beton yang dihasilkan semakin tinggi. Untuk Gambar 10(b), terlihat pada sampel A, semakin tinggi berat beton maka kuat tekan yang dihasilkan semakin tinggi, sedangkan pada sampel C semakin tinggi berat beton maka semakin rendah kuat tekan yang dihasilkan. Untuk sampel B tidak terlihat adanya hubungan antara kuat tekan dengan berat beton yang dihasilkan. Hal ini memungkinkan semakin berat beton yang dihasilkan belum tentu menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi.



Gambar 9. Hubungan Kebutuhan *Cementitious* dengan Kuat Tekan Beton (w/c 0.35) (a) Hubungan Vp/Vv dengan Kuat Tekan Beton (w/c 0.35) (b)

2.



Gambar 10. Hubungan Kebutuhan *Cementitious* dengan Berat Beton (w/c 0.35) (a) Hubungan Berat Beton dengan Kuat Tekan Beton (w/c 0.35) (b)

5. KESIMPULAN

Dengan nilai *void ratio* terkecil (23.5%), menghasilkan kebutuhan semen terendah sebesar 287 kg/m³ secara teoritis dengan w/c 0.5. Setelah dilakukan pengecoran, kebutuhan semen meningkat hingga mencapai 309 kg/m³ dan mendekati standar ACI 302 (310 kg/m³) sehingga belum dapat dikatakan rendah semen. Hasil kuat tekan yang didapatkan juga masih rendah, yaitu 15.3 MPa. Penggantian semen dengan *fly ash* sebesar 50% dapat mengurangi penggunaan semen hingga dibawah standar kebutuhan semen minimum dari ACI 302 (310 kg/m³). Selain itu, mutu beton yang dihasilkan juga lebih tinggi (44.14 MPa) dari pada beton dengan tanpa penggunaan *fly ash* (40.74 MPa). Penambahan *superplasticizer* pada beton dengan semen yang rendah (287 kg/m³) tidak memberikan bantuan dalam meningkatkan *workability* dan menyebabkan *bleeding*. Sedangkan penambahan Vp/Vv tidak selalu meningkatkan kuat tekan pada beton.

6. DAFTAR REFERENSI

- ACI Committee 302. (1997). Guide for Concrete Floor and Slab Construction. *American Concrete Institute* (22p).
- Kwan, K. H. A., & Wong, H. C. H. (2005). Packing Density: A Key Concept for Mix Design of High Performance Concrete. *Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong*, 2–3,13.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete. 2nd Ed. In *Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458*.
- Sankaralingam, P., Roy, C., & Pandev, S. N. (2010). Fly Ash For Cement Concrete. *NTPC Limited* (p.8).
- Wassermann, R., Katz, A., & Bentur, A. (2009). Minimum Cement Content Requirements : A Must or A Myth? *Materials and structures*, (42), 973.
- Yurdakul, E. (2010). *Optimizing Concrete Mixtures with Minimum Cement Content for Performance and Sustainability*. Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University, USA (pp. 18, 61).