

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

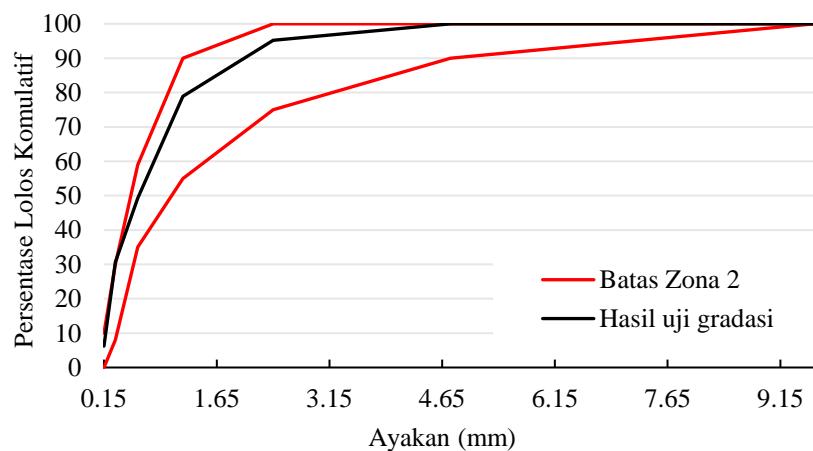
A. Hasil

1. Karakteristik Agregat

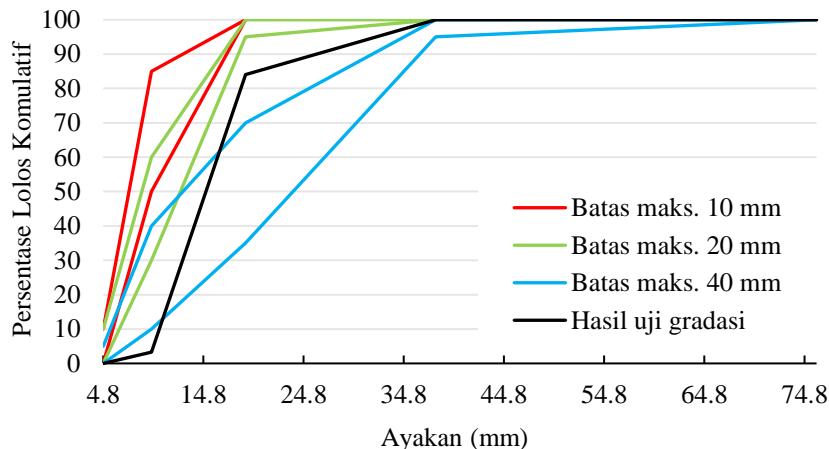
Setelah dilakukan pengujian terhadap pasir, batu pecah, dan abu terbang maka didapatkan karakteristik agregat yang diperlihatkan pada Tabel 16.

Tabel 16. Hasil Pengujian Agregat

Karakteristik	Agregat		
	Pasir	Batu Pecah	Abu Terbang
Berat jenis	2.71	2.48	1.93
Kadar air	1.99%	2.44%	26.67%
Zona	2	-	-
Ukuran maksimum	-	20 mm	-
Modulus halus butir	2.40	7.50	0.96
Kadar lumpur	1.88%	-	-
Bagian hancur oleh mesin Los Angeles	-	48%	-
Kandungan CaO	-	-	0.054%
Kandungan SiO ₂	-	-	42.46%
Kadar lengas	-	-	2.76%
Kelas	-	-	F



Gambar 46. Grafik Hasil Pengujian Gradasi Pasir



Gambar 47. Grafik Hasil Pengujian Gradasi Batu Pecah

Tabel 17. Hasil Pengujian Gradasi Abu Terbang

Ayakan (mm)	Percentase Lulus Komulatif
9.6	100
4.8	99
2.4	97
1.2	97
0.6	94
0.3	83
0.15	34
0.075	20

2. Data Campuran Beton Segar

Setelah dilakukan perancangan campuran beton maka didapatkan proporsi berat antarbahanan dan data campuran beton segar untuk seluruh tipe beton yang secara berurutan diperlihatkan pada Tabel 18 dan Tabel 19.

Tabel 18. Proporsi Berat Antarbahanan Hasil Perancangan Campuran Beton

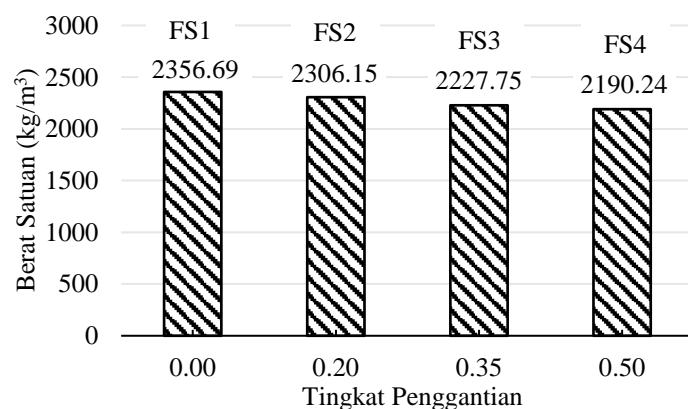
Tipe Beton	Proporsi Berat Antarbahanan
FS1	1.00: 1.67: 2.50: 0.50
FS2	(1.00: 0.20): 1.47: 2.50: 0.504
FS3	(1.00: 0.35): 1.32: 2.50: 0.459
FS4	(1.00: 0.50): 1.17: 2.50: 0.409

Tabel 19. Data Hasil Perancangan Campuran Beton Segar

Data	Tipe Beton			
	FS1	FS2	FS3	FS4
Tingkat penggantian pasir (%)	0	20	35	50
<i>Aggregate-cement ratio</i>	4.17	4.17	4.17	4.17
Faktor efisiensi pozolan	0.00	1.05	0.69	0.45
<i>Fly ash-binder ratio</i>	0.00	0.17	0.26	0.33
<i>Water-binder ratio</i>	0.500	0.504	0.459	0.409
<i>Water-cement ratio</i>	0.500	0.605	0.620	0.613
Kebutuhan semen (kg/m ³)	409.80	385.21	372.92	360.62
Kebutuhan abu terbang (kg/m ³)	0.00	77.04	130.52	180.31
Kebutuhan pasir (kg/m ³)	684.12	566.26	492.25	421.92
Kebutukan batu pecah (kg/m ³)	1026.18	963.02	932.30	901.55
Kebutuhan air (l/m ³)	204.90	232.97	231.08	221.24
Berat satuan (kg/m ³)	2325.00	2224.50	2159.07	2085.64
Perubahan kebutuhan semen (%)	0	-6	-9	-12
Perubahan kebutuhan pasir (%)	0	-17	-28	-38
Perubahan kebutuhan batu pecah (%)	0	-6	-9	-12
Perubahan kebutuhan air (%)	0	13	11	7
Perubahan berat satuan (%)	0	-4	-7	-10
Nilai <i>slump</i> (mm)	140	100	60	30

3. Berat Satuan Beton Keras

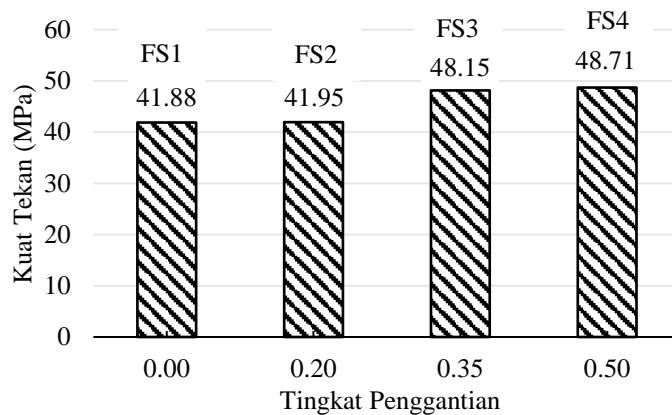
Setelah dilakukan pengukuran diemensi dan berat serta perhitungan berat satuan seluruh benda uji menggunakan Persamaan 25 maka didapatkan berat satuan untuk seluruh tipe beton keras yang diperlihatkan pada Gambar 49.



Gambar 49. Pengaruh Penggantian Sebagian Pasir dengan Abu Terbang terhadap Berat Satuan Beton Keras

4. Kuat Tekan Beton

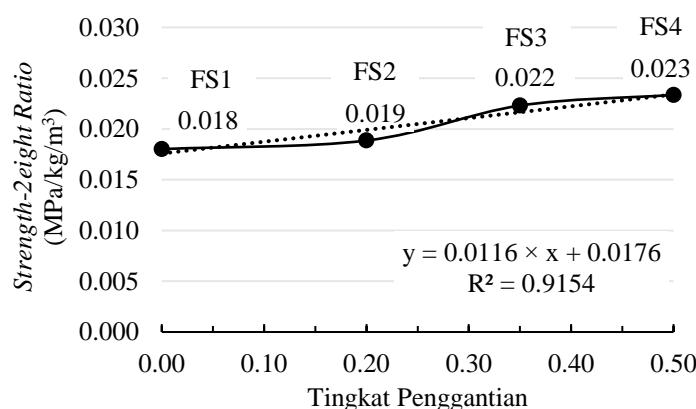
Setelah dilakukan pengujian tekan pada umur 28 dan perhitungan kuat tekan seluruh benda uji menggunakan Persamaan 26 maka didapatkan kuat tekan untuk seluruh tipe beton yang diperlihatkan pada Gambar 50.



Gambar 50. Pengaruh Penggantian Sebagian Pasir dengan Abu Terbang terhadap Kuat Tekan Beton

5. *Strength-Weight Ratio* Beton

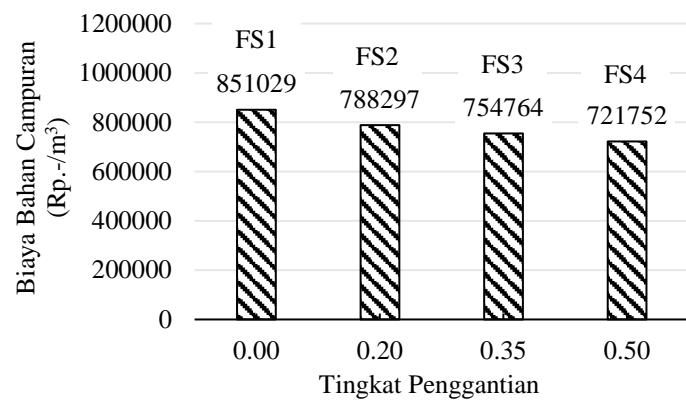
Setelah dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan 27 maka didapatkan nilai *strength-weight ratio* beton yang diperlihatkan pada Gambar 52.



Gambar 52. Pengaruh Penggantian Sebagian Pasir dengan Abu Terbang terhadap *Strength-weight Ratio* Beton

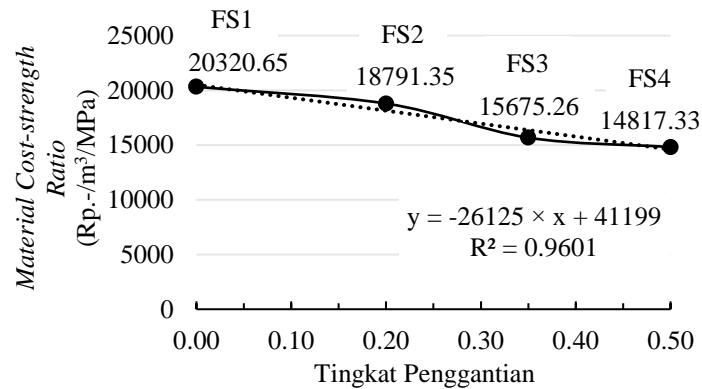
6. *Material Cost-Strength Ratio* Beton

Setelah dilakukan perhitungan berdasarkan harga satuan bahan pada Tabel 15 dan kebutuhan bahan pada Tabel 19 maka didapatkan biaya bahan campuran beton yang diperlihatkan pada Gambar 53.



Gambar 53. Pengaruh Penggantian Sebagian Pasir dengan Abu Terbang terhadap Biaya Bahan Campuran Beton

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan 28 maka didapatkan nilai *material cost-strength ratio* beton yang diperlihatkan pada Gambar 54.



Gambar 54. Pengaruh Penggantian Sebagian Pasir dengan Abu Terbang terhadap *Material Cost-strength Ratio* Beton

B. Pembahasan

1. Berat Jenis dan Kadar Air Agregat

Pada Tabel 16 dapat dilihat bahwa abu terbang adalah agregat yang jauh lebih ringan ketimbang pasir dan batu pecah, karena abu terbang memiliki berat jenis 1.93 sedangkan pasir dan batu pecah secara berurutan memiliki berat jenis 2.71 dan 2.48. Kemudian dapat dilihat juga bahwa abu terbang memiliki kadar air yang paling tinggi yakni sebanyak 26.67%, ketimbang pasir dan batu pecah yang secara berurutan memiliki kadar air sebanyak 1.99% dan 2.44%. Dengan berat jenis 1.93 dan kadar air sebanyak 26.67% maka dapat disimpulkan bahwa abu terbang memiliki sifat hidroskopis yang sangat tinggi.

2. Gradasi Pasir dan Batu Pecah

Pada Tabel 16 dapat dilihat bahwa pasir masuk ke dalam Zona 2 berdasarkan grafik gradasi pasir menurut SNI 03-2834-2000 (Tabel 3) yang diperlihatkan pada Gambar 46, dengan modulus halus butir 2.40 yang memenuhi syarat menurut SK SNI S-04-1989-F (1.5 - 3.8). Kemudian ukuran maksimum batu pecah ditetapkan 20 mm karena grafik gradasi batu pecah yang diperlihatkan pada Gambar 47 tidak sesuai dengan SNI 03-2834-2000 (Tabel 4), dengan modulus halus butir 7.50 yang tidak memenuhi syarat menurut SK SNI S-04-1989-F (6 - 7.1).

3. Kadar Lumpur Pasir dan Kekerasan Batu Pecah

Pada Tabel 16 dapat dilihat bahwa pasir memiliki kadar lumpur sebanyak 1.88% yang memenuhi syarat menurut SK SNI S-04-1989-F, sehingga pasir tidak perlu dicuci. Kemudian bagian batu pecah yang hancur oleh mesin Los Angeles

adalah sebanyak 48% yang memenuhi syarat kekerasan agregat kasar menurut SII 0052-80 (Tabel 5).

4. Gradasi dan Kelas Abu Terbang

Sebagai agregat halus abu terbang memang tidak memenuhi syarat gradasi, karena pada Tabel 16 dapat dilihat bahwa abu terbang memiliki modulus halus butir 0.96 yang tidak memenuhi syarat menurut SK SNI S-04-1989 (1.5 - 3.8). Ukuran butiran abu terbang sangat tidak bervariasi dan sangat kecil jika dibandingkan dengan pasir seperti yang diperlihatkan pada Tabel 17, dimana jumlah butiran abu terbang yang paling sedikit lolos secara komulatif adalah dari ayakan 0.15 mm yakni sebanyak 34% dan ayakan 0.075 mm yakni sebanyak 20%. Sebagai bahan yang bersifat pozolanik, menurut ACAA (2003) abu terbang termasuk ke dalam Kelas F karena mengandung CaO sebanyak 0.054% (kurang dari 10%) dengan kandungan SiO_2 sebanyak 42.46% sebagai reaktan pembentuk CSH dan kadar lengas 2.76%, berdasarkan hasil pengujian parameter yang dilakukan di Laboratorium Padatan dan B3 Balai Besar Teknik Kesehatan Lingkungan dan Pengendalian Penyakit (BBTKLPP) Yogyakarta.

5. Perancangan Campuran Beton Kontrol

Dengan pertimbangan bahwa abu terbang merupakan bahan higroskopis dan *superplasticizer* tidak digunakan maka *water-cement ratio* beton FS1 ditetapkan 0.50 sehingga menurut SNI 03-2834-2000 kuat tekan beton FS1 untuk benda uji silinder pada umur 28 hari adalah 31 MPa. Dengan nilai *slump* yang ditetapkan adalah 120 ± 2 mm, ukuran agregat maksimum sebesar 20 mm, dan jenis agregat

yang digunakan adalah pasir alami dan batu pecah maka perkiraan kebutuhan air untuk pasir dan batu pecah beton FS1 yang secara berurutan menurut SNI 03-2834-2000 (Tabel 14) adalah sebanyak 195 dan 225 l/m³. Dengan demikian maka kebutuhan air dan semen Portland beton FS1 yang secara berurutan didapatkan dari Persamaan 19 dan 20 adalah sebanyak:

$$W = 0.67 \times 195 + 0.33 \times 225 = 204.90 \text{ l/m}^3$$

$$PC = \frac{204.90}{0.50} = 409.80 \text{ kg/m}^3$$

Dengan pasir yang termasuk ke dalam Zona 2 dan berdasarkan grafik menurut SNI 03-2834-2000 (Gambar 44) maka *sand-aggregate ratio* yang didapatkan adalah 0.40, sehingga berat jenis agregat campuran beton FS1 yang didapatkan dari Persamaan 21 adalah:

$$SG_A = 0.40 \times 2.71 + 0.60 \times 2.48 = 2.57$$

Dengan berat jenis agregat campuran 2.57 dan berdasarkan grafik menurut SNI 03-2834-2000 (Gambar 45) maka berat satuan campuran beton FS1 adalah 2325 kg/m³, sehingga kebutuhan agregat campuran, kebutuhan pasir, dan kebutuhan batu pecah beton FS1 yang secara berurutan didapatkan dari Persamaan 24, 22, dan 23 adalah:

$$A = 2325.00 - 204.90 - 409.80 = 1710.30 \text{ kg/m}^3$$

$$S = 0.40 \times 1710.30 = 684.12 \text{ kg/m}^3$$

$$CA = 1710.30 - 684.12 = 1026.18 \text{ kg/m}^3$$

Berdasarkan perancangan yang telah dilakukan maka kebutuhan semen Portland, pasir, batu pecah, dan air beton FS1 secara berurutan adalah sebanyak 409.80, 684.12, 1026.18 kg/m³ dan 204.91 l/m³.

6. Perancangan Campuran Beton dengan Abu Terbang

Pada bagian ini hanya dijelaskan rancang campur beton FS2 sebagai contoh yang mewakili seluruh tipe beton dengan abu terbang. Persentase abu terbang pengganti pada beton FS2 adalah sebanyak 20% (0.20), sehingga faktor efisiensi pozolan abu terbang untuk beton FS2 yang didapatkan dari Persamaan 4 atau grafik pada Gambar 12 adalah:

$$k = 1.25 + 0.14 \times \ln 28 - 3.9 \times 0.20 + 2.75 \times 0.20^2 = 1.05$$

Fly ash-binder ratio, water-binder ratio, dan pengurangan kebutuhan semen Portland beton FS2 yang secara berurutan didapatkan dari Persamaan 3, 2, dan 6 adalah:

$$fab = \frac{0.20}{(1 + 0.20)} = 0.17$$

$$wb = 0.50 \times [(1 - 0.17) + 1.05 \times 0.17] = 0.504$$

$$PC_{FSred} = 0.2 \times 20 + 2 = 6\%$$

Dengan proporsi berat antarbahannya campuran beton FS1 adalah 1.00: 1.67: 2.50: 0.50 maka proporsi berat antarbahannya campuran beton FS2 yang didapatkan dari Persamaan 5 adalah:

$$1.00: (1.67 - 0.20): 2.50: 0.50 = (1.00: 0.20): 1.47: 2.50: 0.504$$

Dengan demikian maka kebutuhan semen Portland, abu terbang, pasir, batu pecah, dan air beton FS2 yang secara berurutan didapatkan dari Persamaan 7, 8, 9, 10, dan 11 adalah sebanyak:

$$PC_{FS} = 409.80 - 0.06 \times 409.80 = 385.21 \text{ kg/m}^3$$

$$FA_{FS} = 0.20 \times 385.21 = 77.04 \text{ kg/m}^3$$

$$S_{FS} = 1.47 \times 385.21 = 566.26 \text{ kg/m}^3$$

$$CA_{FS} = 2.50 \times 385.21 = 963.02 \text{ kg/m}^3$$

$$W_{FS} = 0.504 \times (77.04 + 385.21) = 232.97 \text{ l/m}^3$$

Berdasarkan perancangan yang telah dilakukan maka kebutuhan semen Portland, abu terbang, pasir, batu pecah, dan air beton FS2 secara berurutan adalah sebanyak 385.21, 77.04, 566.26, 963.02 kg/m³ dan 232.97 l/m³.

7. *Aggregate-Cement Ratio*

Aggregat-cement ratio adalah perbandingan seluruh kebutuhan agregat terhadap kebutuhan semen Portland yang dimaksudkan sebagai variabel kontrol dalam penelitian ini, dan *aggregate-cement ratio* ditetapkan menggunakan Persamaan 29.

$$ac_x = \frac{(S_x + CS_x + FA_x)}{PC_x} = 4.17 \quad \text{Persamaan (29)}$$

dimana

ac_x : *aggregat-cement ratio* pada beton x

S_x : kebutuhan pasir pada beton x (kg/m^3)

CS_x : kebutuhan batu pecah pada beton x (kg/m^3)

FA_{Px} : kebutuhan abu terbang pada beton x (kg/m^3)

PC_x : kebutuhan semen Portland pada beton x (kg/m^3)

8. Faktor Efisiensi Pozolan

Pada Tabel 19 dapat dilihat bahwa setiap faktor efisiensi pozolan yang didapatkan dari Persamaan 4 atau grafik pada Gambar 12 oleh Yeh (2013) masih termasuk ke dalam kisaran untuk beton penggantian sebagian pasir dengan abu terbang menurut Rajamane dan Ambily (2013) yakni 0.2 - 1.1.

9. Pengurangan Kebutuhan Pasir

Pada Tabel 19 dapat dilihat bahwa jumlah pengurangan kebutuhan pasir beton FS2, FS3, dan FS4 tidak sama dengan tingkat penggantian pasirnya, yakni secara berurutan sebanyak 17%, 28%, dan 38%. Hal ini dapat terjadi karena pengurangan kebutuhan pasir tidak ditetapkan berdasarkan penggantian pasir dengan abu terbang yang sebenarnya, tetapi ditetapkan menggunakan Persamaan 9 yakni berdasarkan proporsi berat pasir dan kebutuhan semen Portland pada masing-masing tipe beton, dengan proporsi pasir yang ditetapkan menggunakan Persamaan 5 dan hasilnya terlihat pada Tabel 18. Perbedaan jumlah pengurangan kebutuhan pasir terhadap tingkat penggantian pasir ini bergantung pada pengurangan kebutuhan semen Portland dari Persamaan 6 dan proporsi berat pasir beton FS1 sebagai beton kontrol.

Pada Tabel 12 dapat dilihat bahwa proporsi pasir beton kontrol (A) dalam penelitian Rajamane dan Ambily (2013) adalah 1, sedangkan pada Tabel 18 dapat dilihat bahwa proporsi pasir beton kontrol (FS1) dalam penelitian ini adalah 1.67. Jika dibandingkan dengan tanpa adanya pengurangan kebutuhan semen Portland, pada Tabel 12 dapat dilihat bahwa pengurangan kebutuhan pasir beton B dalam penelitian Rajamane dan Ambily (2013) adalah sebanyak 20% yang sama dengan tingkat penggantian pasirnya, sedangkan pada Tabel 19 dapat dilihat bahwa dalam penelitian ini pengurangan kebutuhan pasir beton FS2 adalah sebanyak 12% yang lebih sedikit ketimbang tingkat penggantian pasirnya. Dengan demikian maka pada penggantian sebagian pasir dengan abu terbang berdasarkan proporsi berat masing-masing bahan dapat disimpulkan bahwa jumlah pengurangan kebutuhan pasir bergantung pada proporsi pasir beton kontrol, dimana jika proporsi berat pasir beton kontrol semakin melebihi 1 maka pengurangan kebutuhan pasir akan semakin lebih sedikit ketimbang tingkat penggantian pasir yang sebenarnya.

10. Penurunan Nilai *Slump*

Pada Tabel 19 dapat dilihat bahwa nilai *slump* campuran beton segar FS2, FS3, dan FS4 lebih rendah ketimbang campuran beton segar FS1, walaupun kebutuhan air campuran beton segar FS2, FS3, dan FS4 lebih banyak ketimbang campuran beton segar FS1. Hal ini dapat terjadi karena penggantian sebagian pasir dengan abu terbang dapat meningkatkan total luas permukaan bahan granular (Rajamane dan Ambily, 2013), sehingga meningkatkan kohesivitas campuran beton segar. Hal ini juga dapat terjadi karena ditambah dengan sifat hidroskopis abu terbang dalam keadaan kering alami yang dapat menyerap sebagian besar jumlah

air. Penurunan nilai *slump* ini mungkin dapat diatasi dengan penggunaan *superplasticizer* pada campuran beton segar.



Gambar 48. Campuran Beton Segar saat Pengujian *Slump*

11. Berat Satuan Beton Keras

Pada Gambar 49 dapat dilihat bahwa selalu terjadi penurunan berat satuan beton keras di setiap peningkatan penggantian sebagian pasir dengan abu terbang. Hal ini dapat terjadi karena pada beton FS2, FS3, dan FS4 dilakukan pengurangan kebutuhan semen Portland menggunakan Persamaan 6 yang merupakan persamaan regresi linear pengurangan kebutuhan semen Portland dari rancang campur beton dalam penelitian Rajamane dan Ambily (2013) pada Tabel 12. Kemudian pengurangan kebutuhan semen Portland mengakibatkan seluruh kebutuhan bahan campuran lainnya ikut berkurang karena masing-masing kebutuhannya ditetapkan menggunakan Persamaan 8 sampai dengan 11, dimana hal yang dipertimbangkan adalah kebutuhan semen Portland dan proporsi berat bahan-bahan lainnya.

Pengurangan kebutuhan semen Portland menunjukkan seolah-olah pada penelitian ini juga dilakukan penggantian sebagian semen dengan abu terbang, padahal sebenarnya tidak sedemikian. Hal ini karena pengurangan kebutuhan

Portland turut mengakibatkan pengurangan seluruh kebutuhan bahan campuran lainnya seperti telah dijelaskan sebelumnya. Hal ini juga karena pada Tabel 18 dapat dilihat bahwa proporsi semen Portland di setiap tipe beton adalah sama yakni 1 dan jika dijumlahkan dengan proporsi abu terbang maka akan menghasilkan proporsi *binder* yang semakin besar seiring dengan peningkatan penggantian pasir. Adapun penyebab dilakukannya pengurangan kebutuhan semen Portland dalam penelitian Rajamane dan Ambily (2013) masih belum diketahui, namun dapat diindikasikan bahwa pengurangan kebutuhan semen Portland adalah sebagai upaya untuk mendapatkan volume campuran beton dengan abu terbang yang sama dengan campuran beton kontrol seperti telah dijelaskan pada BAB II J.

12. Kuat Tekan Beton

Pada Gambar 50 dapat dilihat bahwa kuat tekan beton FS1 yang didapatkan adalah sebesar 41.88 MPa yang jauh di atas kuat tekan yang direncanakan. Kenaikan kuat tekan ini dapat terjadi disebabkan oleh kesalahan pada penentuan ukuran agregat maksimum. Pada Gambar 47 dapat dilihat bahwa gradasi batu pecah cenderung masuk ke dalam batas ukuran agregat maksimum 40 mm, sedangkan saat perancangan campuran beton ukuran agregat maksimum yang ditetapkan adalah sebesar 20 mm. Hal ini mengakibatkan peningkatan jumlah semen Portland pada beton FS1 yang jauh lebih banyak dari seharusnya.

Gambar 50 juga memperlihatkan bahwa kuat tekan beton FS2 adalah sebesar 41.95 MPa yang relatif sama dengan beton FS1. Hal ini dapat terjadi karena *water-binder ratio* beton FS2 memang dapat mengoptimalkan reaksi campuran pozolanik, yang mana abu terbang tidak hanya menjadi bahan pengisi melainkan dapat

membentuk CSH tambahan yang cukup untuk mengganti kuat tekan yang hilang akibat pengurangan kepadatan beton.



Gambar 51. Benda Uji Beton setalah Pengujian Tekan

Pada Gambar 50 juga dapat dilihat bahwa beton FS3 dan FS4 secara berurutan memiliki kuat tekan sebesar 48.15 dan 48.71 MPa yang jauh lebih tinggi ketimbang beton FS1 dan FS2. Pada Tabel 19 dapat dilihat bahwa pengurangan kebutuhan pasir beton FS2 adalah mendekati tingkat penggantian pasirnya yakni sebanyak 20%, sedangkan pengurangan kebutuhan pasir beton FS3 dan FS4 secara berurutan adalah cukup lebih sedikit dan jauh lebih sedikit dari tingkat penggantian pasirnya yakni sebanyak 35% dan 50%. Kemudian pada Tabel 19 juga dapat dilihat bahwa persentase kebutuhan abu terbang terhadap semen Portland beton FS2, FS3, dan FS4 adalah sama dengan tingkat penggantian pasir betonnya masing-masing. Dengan demikian maka dapat diindikasikan bahwa CSH tambahan yang terbentuk dalam beton FS3 dan FS4 mungkin lebih dari cukup untuk menghasilkan kuat tekan pengganti dari yang hilang akibat pengurangan kepadatan betonnya masing-masing. Hal ini yang kemudian dapat menyebabkan peningkatan kuat tekan beton FS3 dan FS4 yang jauh lebih tinggi ketimbang beton FS1 dan FS2.

Secara keseluruhan, tidak didapatkannya kuat tekan beton FS2, FS3, dan FS4 yang lebih rendah ketimbang beton FS1 dapat dibuktikan dari berat satuan beton keras pada Gambar 49 yang jika dibandingkan dengan berat satuan campuran beton segar pada Tabel 19. Dapat dilihat bahwa penambahan berat setuan beton keras FS1, FS2, FS3, dan FS4 terhadap campuran beton segarnya secara berurutan adalah sebanyak 1%, 4%, 3%, dan 5%. Hal ini menandakan bahwa reaksi pozolanik abu terbang yakni penambahan CH, CSH, dan *ettringite* seperti terlihat pada Gambar 3 memang terjadi di dalam beton, sehingga penambahan berat satuan pada beton keras FS2, FS3, dan FS4 adalah lebih banyak ketimbang beton keras FS1.

13. *Strength-weight Ratio* Beton

Seperti yang telah diketahui bahwa berat satuan beton adalah beban merata yang harus ditanggung oleh suatu struktur beton bertulang, sehingga berat satuan beton dapat dikatakan sebagai kekurangan yang dimiliki oleh beton. Sebagai contoh, semakin besar berat satuan beton pada struktrur balok *girder* jembatan atau jalan layang maka momen lentur yang dihasilkan akan semakin besar. Dengan demikian beton yang semakin memiliki kuat tekan tinggi dan berat satuan kecil dapat dikatakan memiliki efisiensi kinerja yang semakin tinggi. Nilai *strength-weight ratio* beton dapat dijadikan sebagai paramameter untuk menentukan efisisensi kinerja beton yakni kuat tekan yang jika dibandingkan dengan berat satuan sebagai kekurangan beton, dimana semakin tinggi nilai *strength-weight ratio* maka kinerja beton semakin efisien.

Pada Gambar 52, dapat dilihat bahwa selalu terjadi peningkatan nilai *strength-weight ratio* di setiap peningkatan penggantian pasir dengan abu terbang,

sehingga beton FS2, FS3, dan FS4 memiliki kinerja yang lebih efisien ketimbang beton FS1 sebagai beton normal. Hal ini dapat terjadi karena pada beton FS2, FS3, dan FS4 dilakukan pengurangan kebutuhan semen Portland yang diikuti dengan pengurangan kebutuhan bahan campuran lainnya, sehingga berat satuan beton keras FS2, FS3, dan FS4 adalah lebih rendah ketimbang pada beton keras FS1 seperti terlihat pada Gambar 49. Namun demikian kuat tekan beton FS2, FS3, dan FS4 tidak lebih rendah ketimbang beton FS1 seperti terlihat pada Gambar 50. Hal ini terjadi karena abu terbang dapat bereaksi secara pozolanik dengan optimal untuk menghasilkan CSH tambahan sebagai pengganti kuat tekan yang hilang akibat pengurangan kepadatan beton.

14. *Material Cost-strength Ratio* Beton

Seperti yang telah diketahui bahwa kebanyakan struktur bangunan yang menggunakan beton bertulang masih direncanakan menggunakan kuat tekan sebagai karakteristik beton yang dipertimbangkan. Dengan demikian nilai *material cost-strength ratio* dapat dijadikan sebagai parameter untuk menentukan keekonomisan beton, dimana semakin kecil nilai *material cost-strength ratio* maka beton semakin ekonomis.

Pada Gambar 54, dapat dilihat bahwa selalu terjadi penurunan nilai *material cost-strength ratio* beton di setiap peningkatan penggantian sebagian pasir dengan abu terbang yang mengindikasikan bahwa beton FS2, FS3, dan FS4 memiliki keekonomisan yang lebih tinggi ketimbang beton FS1 sebagai beton normal. Hal ini dapat terjadi karena selain abu terbang merupakan limbah yang dapat dikatakan tidak bernilai, perancangan campuran beton FS2, FS3, dan FS4 dengan penerapan

faktor efisiensi pozolan yang telah dilakukan dapat mengurangi kebutuhan semen Portland dan bahan campuran lainnya seperti terlihat pada Tabel 19, sehingga mengurangi biaya bahan campuran beton yang terlihat pada Gambar 53. Namun demikian beton FS2, FS3, dan FS4 memiliki kuat tekan tidak lebih rendah ketimbang beton FS1 seperti terlihat pada Gambar 50, karena abu terbang dapat bereaksi secara pozolanik dengan optimal untuk menghasilkan CSH tambahan yang berperan sebagai pengganti kuat tekan yang hilang akibat pengurangan kepadatan beton.

C. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan terkait dengan metodologi yakni sebagai berikut:

1. Pada abu terbang hanya dilakukan pengujian parameter kandungan CaO, SiO₂, dan kadar lengas.
2. Uji coba untuk penetapan faktor efisiensi pozolan tidak dilakukan, sehingga faktor efisiensi pozolan ditetapkan menggunakan Persamaan 4 atau grafik pada Gambar 12 oleh Yeh (2013) untuk penggantian sebagian semen, tipe semen Portland biasa, jenis agregat normal, dan kondisi perawatan beton normal.
3. Hal yang dipertimbangkan dalam pengurangan kebutuhan semen Portland masih belum diketahui, sehingga pengurangan kebutuhan semen Portland ditetapkan menggunakan Persamaan 6 berdasarkan rancang campur beton dalam penelitian Rajamane dan Ambily (2013) pada Tabel 12.

