

OPTIMASI PENGGUNAAN *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH* PLTU SURALAYA DALAM PEMBUATAN *PAVING BLOCK* MUTU TINGGI

Aldwin Ivan Gan¹, Henry Sutikno², Antoni³, Djwantoro Hardjito⁴

ABSTRAK : *Fly ash* dan *bottom ash* merupakan limbah hasil pembakaran batu bara yang dapat dimanfaatkan dalam bidang konstruksi. Pemanfaatan *bottom ash* masih sangat jarang, sehingga pada penelitian ini *bottom ash* dan *fly ash* dimanfaatkan untuk menggantikan sebagian agregat halus dan semen dalam pembuatan *paving block*. Untuk menghasilkan *paving block* dengan kuat tekan yang optimal, perlu dicari kepadatan tertinggi dari kombinasi agregat halus yang digunakan. Selain kuat tekan, penyerapan air dan ketahanan aus juga menjadi kualifikasi dalam penentuan mutu *paving block*. Dari hasil pembuatan *paving block*, kuat tekan tertinggi yang bisa didapat dari penambahan *bottom ash* yaitu 41.60 MPa dengan kode C1BA3 yang masuk dalam kelas A. Namun untuk uji penyerapan air dan ketahanan aus, *paving C1BA3* hanya masuk dalam kelas B dan C. Dengan penambahan *fly ash*, kuat tekan maksimum yang dihasilkan hanya mencapai 26.80 MPa yang masuk dalam kelas B. Akan tetapi penambahan *fly ash* berdampak pada ketahanan aus yang pada awalnya hanya memenuhi kelas C, kini bisa mencapai kelas A. Secara keseluruhan, *paving block* yang menghasilkan mutu paling bagus dan ekonomis yaitu *paving* dengan kode C5F5B30, dengan komposisi 50% semen : 50% *fly ash* dan 100% *bottom ash*.

KATA KUNCI : *fly ash*, *bottom ash*, *paving block*, kuat tekan, serapan air, ketahanan aus

1. PENDAHULUAN

Penggunaan semen dan pasir secara berlebihan dalam produksi *paving block* merupakan salah satu penyebab kerusakan lingkungan. Di lain pihak, jumlah limbah pembakaran batu bara berupa *fly ash* dan *bottom ash* semakin bertambah seiring dengan berjalannya waktu. *Fly ash* sudah banyak digunakan dalam bidang konstruksi dan telah mencapai angka 47% penggunaan, sedangkan *bottom ash* masih jarang digunakan dan hanya mencapai angka 5.28% penggunaan (Naganathan et al., 2015).

Fly ash merupakan limbah pembakaran batu bara yang berterbangan dan melekat pada bagian atas tungku, sedangkan *bottom ash* adalah limbah pembakaran yang jatuh pada dasar tungku (Aggarwal & Siddique, 2014). Kandungan kimia yang terdapat dalam *fly ash* dan *bottom ash* bergantung pada sumber dan metode pembakaran batu bara yang digunakan. *Fly ash* umumnya memiliki bentuk seperti bola dan berukuran 1 μm hingga 150 μm (Rangan et al., 2005). Ukuran *bottom ash* lebih besar dari partikel *fly ash*, dan *bottom ash* memiliki volume *void* yang besar sehingga permukaannya kasar.

Penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* untuk pembuatan beton dapat mengurangi kerusakan lingkungan yang terjadi. *Fly ash* digunakan untuk menggantikan semen, sedangkan *bottom ash* digunakan untuk menggantikan pasir. Permukaan *bottom ash* yang kasar menyebabkan penurunan kelecakan pada campuran beton (Sugiyanto et al., 2015).

Paving block merupakan salah satu bahan perkerasan permukaan jalan yang umumnya terbuat dari campuran semen atau bahan perekat lainnya, air, dan agregat. Terdapat beberapa klasifikasi mutu dari *paving block* berdasarkan kegunaannya, yaitu mutu kelas A, B, C, dan D (Badan Standarisasi Nasional, 1996). Pada proses pembuatan *paving block* tidak dibutuhkan nilai kelecakan yang tinggi, sehingga

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21413158@petra.ac.id

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, m21413159@petra.ac.id

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

⁴Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya, djwantoro.h@petra.ac.id

penggunaan *bottom ash* sebagai agregat dalam pembuatan *paving block* tidak memberikan dampak yang besar.

Penelitian ini mencoba mengoptimalkan penggunaan *fly ash* tipe F dan *bottom ash* dari PLTU Suralaya dalam pembuatan *paving block*. *Fly ash* digunakan sebagai pengganti sebagian semen. *Bottom ash* yang digunakan merupakan kombinasi antara 50% *bottom ash* kasar dan 50% *bottom ash* halus. *Bottom ash* kasar memiliki gradasi ukuran di atas 1.18 mm yang lebih banyak dibandingkan dengan *bottom ash* halus, dan sebaliknya *bottom ash* halus memiliki gradasi ukuran di bawah 1.18 mm yang lebih banyak dibandingkan *bottom ash* kasar. Abu batu juga digunakan untuk dicampur dengan *bottom ash* untuk memberi variasi ukuran dan bentuk. Abu batu merupakan sisa dari hasil pengolahan batu pecah dengan menggunakan *stone crusher*. Abu Batu memiliki ukuran hingga 10 mm dan berbentuk pipih. Evaluasi dilakukan pada pencampuran *bottom ash* dan abu batu sebagai agregat, serta penambahan *fly ash* tipe F sebagai pengganti sebagian semen. Setelah itu, dicari komposisi yang paling optimum antara semen, *fly ash*, *bottom ash*, dan abu batu.

2. RANCANGAN PENELITIAN

2.1 Material

Material yang digunakan untuk membuat *paving block* pada penelitian ini berupa semen, *fly ash*, *bottom ash*, abu batu, pasir, dan air. Semen dan *fly ash* sebagai bahan perekat pada campuran, sedangkan *bottom ash*, abu batu, dan pasir sebagai agregat, dan air sebagai pencampur. Semen yang digunakan adalah *Portland Pozzolan Cement* (PPC) merk Semen Gresik. *Fly ash* dan *bottom ash* yang digunakan berasal dari PLTU Suralaya. Abu batu, pasir, dan air yang digunakan didapat dari tempat pembuatan *paving block*, UD. Manna. Bentuk *fly ash*, *bottom ash*, dan abu batu dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Bentuk *Fly ash*, *Bottom ash*, dan Abu Batu

2.2 Analisa Awal

Analisa awal dilakukan pada material sebelum digunakan untuk membuat *paving block*. Analisa awal yang dilakukan terhadap *fly ash* dan *bottom ash* berupa pengetesan XRF (*X-Ray Fluorescence*) di Laboratorium PT. Superintending Company of Indonesia (Sucofindo). Hasil pengetesan XRF menunjukkan bahwa *fly ash* yang digunakan merupakan tipe F, karena mempunyai kadar $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (80.10%) > 70% dan mempunyai kadar CaO (7.77%) < 10%. Kandungan kimia *fly ash* dan *bottom ash* PLTU Suralaya selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil XRF *Fly Ash* dan *Bottom Ash* PLTU Suralaya

Komponen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MnO ₂	P ₂ O ₅	LOI
<i>Fly Ash</i> (%)	45.74	25.04	9.32	0.91	7.77	4.09	1.12	1.81	0.67	0.14	0.27	2.78
<i>Bottom Ash</i> (%)	59.30	20.74	7.49	0.67	4.36	2.43	0.54	1.52	0.04	0.08	0.14	2.20

2.3 Flow Table Test Pasta

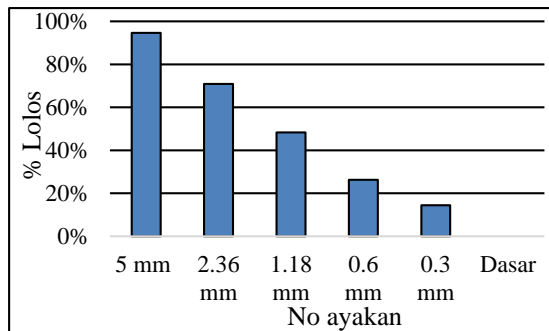
Flow table test dilakukan untuk mendapatkan pasta dengan komposisi semen, fly ash, dan air yang memiliki kelecakan maksimum serta kebutuhan air yang minimum. Hasil flow table test dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Flow Table Test

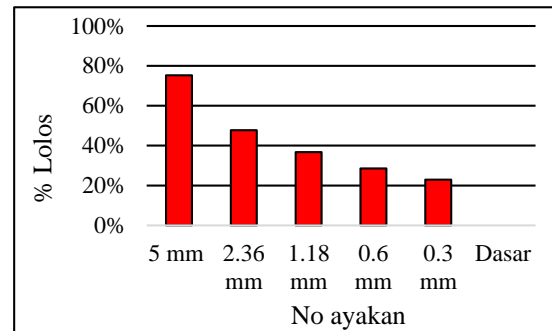
Kode	Semen (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	w/c	Air (kg/m ³)	Flow (cm)
F0	2667	0	0.35	933	15.5
F10	2160	240		840	18.5
F20	1920	480		840	19.5
F30	1680	720		840	19
F40	1440	960		840	19

2.4 Gradasi Agregat

Agregat yang digunakan berupa bottom ash dan abu batu. Bottom ash yang diperoleh dari PLTU Suralaya terdiri dari 2 jenis, yaitu bottom ash kasar dan bottom ash halus. Bottom ash kasar memiliki jumlah butiran besar (>1.18 mm) yang lebih banyak dari bottom ash halus, sedangkan bottom ash halus memiliki jumlah butiran kecil (<1.18 mm) yang lebih banyak dari bottom ash kasar. Gradasi abu batu dan gradasi campuran bottom ash kasar dan halus dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



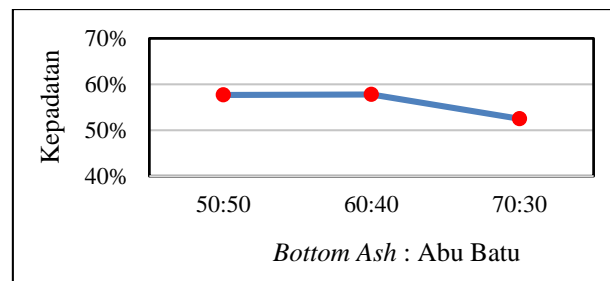
Gambar 2. Gradasi Abu Batu



Gambar 3. Gradasi Bottom Ash

2.5 Kepadatan Campuran Agregat

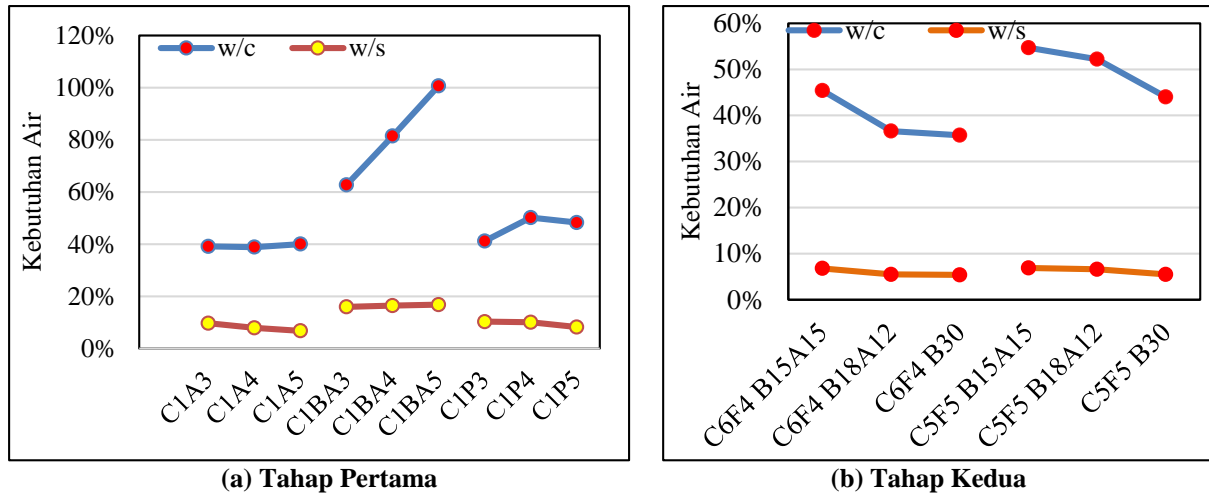
Kepadatan dihitung dengan cara menentukan berat volume campuran, kemudian dibagi dengan jumlah dari persentase dikalikan berat jenis dari masing-masing jenis agregat. Semakin padat campuran agregat yang digunakan maka semakin kecil volume void pada campuran agregat tersebut. Grafik kepadatan campuran bottom ash dan abu batu dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Kepadatan Campuran Bottom Ash dan Abu Batu

2.6 Kebutuhan Air pada Material Paving

Kebutuhan air yang semakin besar untuk tingkat kelecakan yang diharapkan membuat kuat tekan *paving* yang dihasilkan berkurang. Untuk mengevaluasi kebutuhan air diperlukan data *w/c* (*water/cement*) dan *w/s* (*water/solid*), dimana *w/c* merupakan perbandingan air terhadap semen dan *w/s* merupakan perbandingan air terhadap jumlah material *solid* seperti semen, *fly ash*, dan agregat (*bottom ash*, abu batu, dan pasir). Grafik kebutuhan air total tahap pertama dan kedua dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Grafik Kebutuhan Air Total

2.7 Mix Design Paving

Dalam pembuatan *paving block*, digunakan beberapa macam komposisi campuran yang dibagi menjadi 2 tahap pembuatan. Pada tahap pertama, *paving block* dibuat dengan menggunakan campuran semen, pasir, abu batu, dan *bottom ash* untuk menentukan *mix design* yang menghasilkan kuat tekan paling maksimum. Setelah itu dilanjutkan dengan tahap kedua yang merupakan tahap untuk membandingkan komposisi *fly ash* terhadap semen yang paling optimal dengan menggunakan gradasi *bottom ash* dan abu batu yang paling padat agar mendapat kuat tekan yang paling tinggi. *Mix design paving block* tahap pertama dan kedua dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**.

Tabel 3. Mix Design Paving Tahap Pertama

Variabel	Kode								
	C1A3	C1A4	C1A5	C1BA3	C1BA4	C1BA5	C1P3	C1P4	C1P5
Semen	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bottom Ash				1.5	2	2.5			
Pasir							3	4	5
Abu Batu	3	4	5	1.5	2	2.5			

Tabel 4. Mix Design Paving Tahap Kedua

Variabel	Kode					
	C6F4B15A15	C6F4B18A12	C6F4B30	C5F5B15A15	C5F5B18A12	C5F5B30
Semen	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5
Fly Ash	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
Bottom Ash	1.5	1.8	3	1.5	1.8	3
Abu Batu	1.5	1.2	-	1.5	1.2	-

3. HASIL PENGETESAN DAN PEMBAHASAN

3.1 Kuat Tekan

Sampel dengan agregat halus berupa 100% abu batu memiliki kuat tekan yang paling besar. Sampel C1A3 dan C1A4 memiliki kuat tekan yang memenuhi syarat *paving* kelas A pada SNI 03-0691-1996, yaitu sebesar 60.400 MPa dan 51.83 MPa. Sampel C1A5 tidak memenuhi syarat kuat tekan *paving* kelas A karena hanya mempunyai kuat tekan sebesar 39.70 MPa pada umur 28 hari. Sampel dengan agregat berupa 100% pasir memiliki kuat tekan pada umur awal yang rendah, dan hanya sampel C1P3 yang memenuhi syarat kuat tekan *paving* kelas A pada umur 28 hari, yaitu sebesar 44.86 MPa. Sampel dengan agregat berupa kombinasi antara 50% *bottom ash* dan 50% abu batu memiliki peningkatan kuat tekan *paving* yang terjadi tidak terlalu besar, sehingga hanya sampel C1BA3 yang memenuhi syarat kuat tekan *paving* kelas A pada umur 28 hari dengan kuat tekan sebesar 41.60 MPa.

Penggunaan *fly ash* tipe F sebagai pengganti sebagian semen dalam pembuatan *paving* membuat kuat tekan *paving block* yang dihasilkan menurun. Kuat tekan yang dihasilkan oleh semua sampel yang menggunakan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen tidak ada yang memenuhi syarat kuat tekan *paving block* kelas A pada SNI 03-0691-1996. Sampel C5F5B15A15 memiliki kuat tekan pada umur 28 hari yang paling besar di antara semua sampel yang menggunakan *fly ash*, yaitu sebesar 26.88 MPa. Penambahan abu batu sebagai pengganti sebagian *bottom ash* membuat kuat tekan *paving block* yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan *paving block* yang menggunakan 100% *bottom ash* sebagai agregatnya. Hal ini disebabkan oleh kepadatan yang dihasilkan dari campuran *bottom ash* dan abu batu lebih padat dibandingkan dengan kepadatan yang dihasilkan oleh *bottom ash* saja. Kuat tekan yang dihasilkan oleh sampel yang menggunakan agregat 1.5 *bottom ash* : 1.5 abu batu tidak beda jauh dengan kuat tekan yang dihasilkan oleh sampel yang menggunakan agregat 1.8 *bottom ash* : 1.2 abu batu, karena kepadatan yang dihasilkan oleh kedua macam campuran itu juga tidak beda jauh. Kuat tekan *paving block* dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Kuat Tekan Paving

Kode	Variable					Kuat Tekan (MPa)		
	Semen	FA	BA	AB	Pasir	7 hari	14 hari	28 hari
C1A3	1	-	-	3	-	52.50	55.88	60.40
C1A4	1	-	-	4	-	39.90	41.20	51.83
C1A5	1	-	-	5	-	34.64	-	39.70
C1BA3	1	-	1.5	1.5	-	38.09	-	41.60
C1BA4	1	-	2	2	-	33.11	35.77	37.80
C1BA5	1	-	2.5	2.5	-	24.70	28.74	31.30
C1P3	1	-	-	-	3	24.12	34.81	44.86
C1P4	1	-	-	-	4	15.64	25.15	27.21
C1P5	1	-	-	-	5	12.90	18.11	20.60
C6F4B15A15	0.6	0.4	1.5	1.5	-	21.13	24.74	26.14
C6F4B18A12	0.6	0.4	1.8	1.2	-	19.50	22.00	24.57
C6F4B30	0.6	0.4	3	-	-	14.97	17.55	19.75
C5F5B15A15	0.5	0.5	1.5	1.5	-	21.59	25.11	26.88
C5F5B18A12	0.5	0.5	1.8	1.2	-	19.22	24.04	26.11
C5F5B30	0.5	0.5	3	-	-	17.69	19.82	20.77

3.2 Serapan Air

Serapan air pada *paving block* berpengaruh buruk terhadap durabilitas *paving block*, dimana semakin banyak air yang diserap oleh *paving* tersebut, semakin menurun durabilitas dan ketahanannya. Oleh karena itu, pada umur 28 hari, dilakukan tes serapan air pada *paving* tersebut. Penyerapan air selalu meningkat tiap pengurangan jumlah semen dan penambahan jumlah agregat. Hal ini dikarenakan jumlah semen yang mengisi volume *void* pada campuran agregat semakin sedikit, sedangkan dengan bertambahnya jumlah agregat maka semakin besar volume *void* yang terdapat pada campuran agregat

tersebut. Semakin besarnya volume *void* yang tidak terisi oleh semen menyebabkan penyerapan air yang terjadi pada *paving* semakin besar. *Paving* yang menggunakan campuran *bottom ash* dan abu batu mempunyai penyerapan air lebih besar jika dibandingkan dengan *paving* yang menggunakan abu batu saja, karena *bottom ash* mempunyai volume *void* yang lebih besar dibanding abu batu. Penggunaan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen mengurangi serapan air pada *paving*, tetapi penggunaan 60% *fly ash* untuk menggantikan semen tidak memiliki perbedaan yang signifikan bila dibandingkan dengan penggunaan 50% *fly ash* untuk menggantikan semen. Hasil uji serap air dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Serapan Air Paving

Kode	Berat Kering	Berat Basah	%	Kelas
C1A3	3070.0	3198.0	4.17	B
C1A4	2553.0	2688.0	5.29	B
C1A5	2675.0	2848.0	6.47	C
C1BA3	2362.0	2488.0	5.33	B
C1BA4	2387.0	2547.0	6.7	C
C1BA5	2057.0	2210.0	7.44	C
C1P3	2444.0	2632.0	7.69	C
C1P4	2489.0	2716.0	9.12	C
C1P5	-	-	-	-

Kode	Berat Kering	Berat Basah	%	Kelas
C6F4 B15A15	2798.0	2914.2	4.15	B
C6F4 B18A12	3064.0	3172.4	3.54	B
C6F4 B30	2875.0	3071.1	6.82	C
C5F5 B15A15	2910.0	3030.2	4.13	B
C5F5 B18A12	3210.0	3314.5	3.26	B
C5F5 B30	3011.0	3157.9	4.88	B

3.3 Uji Ketahanan Aus

Paving yang menggunakan pasir mempunyai nilai ketahanan aus yang lebih baik dibandingkan dengan *paving block* yang menggunakan abu batu dan *bottom ash*, karena pasir mempunyai rekatan antar partikel yang lebih baik dibandingkan abu batu dan *bottom ash*. Penambahan *fly ash* untuk menggantikan sebagian semen menghasilkan *paving* dengan ketahanan aus yang lebih baik karena menggunakan semen yang lebih sedikit. Hasil uji ketahanan aus dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7. Ketahanan Aus Paving

Kode	Berat sebelum (g)	Berat setelah tes (g)	Lama aus (menit)	Berat jenis	Hasil aus (%)	Kelas
C1A3	3165.7	3154.9	10	1.76	0.11	B
C1A4	2639	2634.3	6	1.79	0.08	A
C1A5	2784.7	2779.7	6	1.79	0.08	A
C1BA3	2416.6	2405.3	6	1.89	0.18	C
C1BA4	2384	2366.9	10	1.92	0.16	C
C1BA5	2217.2	2214.1	6	1.87	0.05	A
C1P3	2599.3	2595.5	6	1.84	0.06	A
C1P4	2668.8	2664.2	6	1.9	0.07	A
C1P5	2469.4	2453.2	6	1.95	0.25	D
C6F4 B15A15	2801.5	2796.4	10	2.094	0.043	A
C6F4 B18A12	2966.6	2963.3	10	1.998	0.029	A
C6F4 B30	3266.1	3261.1	10	2.009	0.044	A
C5F5 B15A15	3118.1	3114.7	10	1.992	0.03	A
C5F5 B18A12	2974	2962.2	10	2.211	0.094	A
C5F5 B30	3091.8	3083	10	2.159	0.072	A

3.4 Hasil Mutu *Paving*

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *paving block* dengan kode C5F5B30 yang memenuhi mutu kelas B menurut SNI 03-0691-1996 merupakan *paving block* dengan campuran yang paling ekonomis. Hasil rekapan untuk mutu *paving* dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8. Mutu *Paving Block*

Kode	Kuat Tekan	Serapan Air	Ketahanan Aus	Kelas
C1A3	A	B	B	B
C1A4	A	B	A	B
C1A5	B	C	A	C
C1BA3	A	B	C	C
C1BA4	B	C	C	C
C1BA5	B	C	A	C
C1P3	A	C	A	C
C1P4	B	C	A	C
C1P5	B	-	D	D

Kode	Kuat Tekan	Serapan Air	Ketahanan Aus	Kelas
C6F4 B15A15	B	B	A	B
C6F4 B18A12	B	B	A	B
C6F4 B30	C	B	A	C
C5F5 B15A15	B	B	A	B
C5F5 B18A12	B	C	A	B
C5F5 B30	B	B	A	B

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. *Bottom ash* dan *fly ash* dari PLTU Suralaya dapat digunakan sebagai pengganti sebagian agregat dan semen dalam pembuatan *paving block*, dengan kuat tekan maksimum yang didapat ialah sebesar 41.60 MPa pada komposisi C1BA3 berupa 50% abu batu : 50% *bottom ash*.
2. Kuat tekan tertinggi yang dapat diperoleh dari penambahan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dan penambahan *bottom ash* sebagai pengganti sebagian agregat ialah sebesar 26,88 MPa pada komposisi C5F5B15A15 berupa 50% *fly ash* : 50% semen dan 50% abu batu : 50% *bottom ash*.
3. Kepadatan tertinggi yang diperoleh dari kombinasi abu batu dan *bottom ash* dengan kadar *bottom ash* diatas 50% yaitu 60% *bottom ash* dan 40% abu batu.
4. Penambahan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dalam pembuatan *paving block* menghasilkan kualitas yang lebih baik dibandingkan pembuatan *paving block* dengan menggunakan 100% semen. Meskipun menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah, namun memenuhi syarat *paving block* kelas B secara keseluruhan dibandingkan *paving* yang menggunakan 100% semen yang hanya memenuhi syarat kelas C dalam pengetesan ketahanan aus.
5. Pengaruh penambahan *fly ash* tipe F sebagai pengganti sebagian semen tidak berpengaruh dalam penambahan kuat tekan *paving block*, namun berpengaruh dalam pengetesan ketahanan aus dan penyerapan air dengan menghasilkan nilai yang lebih kecil.
6. *Paving block* yang menghasilkan mutu paling tinggi dan ekonomis dengan penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* yang paling optimum ialah *paving* C5F5B30 dengan mutu kelas B.

5. DAFTAR REFERENSI

- Aggarwal, Y., & Siddique, R. (2014). Microstructure and Properties of Concrete using *Bottom ash* and Waste Foundry Sand as Partial Replacement of Fine Aggregates. *Construction and Building Materials*, 54, 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051>
- Badan Standarisasi Nasional. (1996). SNI 03-0691-1996 Bata Beton (*Paving block*). Bandung: Badan Standarisasi Nasional.

- Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., & Mustapha, K. N. (2015). Performance of Bricks Made Using *Fly ash and Bottom ash*. *Construction and Building Materials*, 96, 576– 580.
<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.06>
- Rangan, B. V., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Sumajouw, D. M. J. (2005). *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Curtin University of Technology.
- Sugiyanto, G., Harmawan, A., & Mulyono, B. (2015). The Characteristics of Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) Mixture with Bottom Ash as Aggregate Substitute. *Civil Engineering Dimension*, 17(1), 29–37. <https://doi.org/10.9744/ced.17.1.29-37>