



DOI: <https://doi.org/10.38035/jim.v4i4>
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Optimasi Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash terhadap Mutu Paving Block Berkelanjutan

Septian Martha Nugraha¹, Arie Putra Usman², K.M. Aminuddin³

¹Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia, smnugraha@bukitasam.co.id

²Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia, arieputrausman@ft.unsri.ac.id

³Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia, kmaminuddin@ft.unsri.ac.id

Corresponding Author: arieputrausman@ft.unsri.ac.id²

Abstract: *The rapid growth of infrastructure development has significantly increased the demand for construction materials such as cement and sand, consequently exerting pressure on natural resources. Meanwhile, coal-fired power plants (CFPPs) generate substantial quantities of fly ash (FA) and bottom ash (BA), which pose environmental risks if not properly managed and utilized. This study investigates the potential use of FA and BA as partial replacements for cement and sand, respectively, in the production of sustainable paving blocks compliant with SNI 03-0691-1996. An experimental method was employed with nine mix variations, in which FA was used up to 45% as a cement substitute and BA up to 45% as a sand substitute. The results showed that the normal paving block achieved a maximum compressive strength of 21 MPa and a water absorption of 5.21% (quality grade B). A mix with 15% FA substitution and no BA achieved a compressive strength of 19.99 MPa and a water absorption of 5.88% (quality grade C). The reduced performance at higher FABA content was attributed to increased porosity and incomplete pozzolanic reactions, consistent with the findings of Babalu et al. (2023), which reported a decline in strength at fly ash contents above 30%. Mix variations containing up to 35% FABA can still be utilized for paving block production, although only meeting quality grade D standards. Nevertheless, this approach supports environmentally friendly waste management while reducing the exploitation of natural resources.*

Keywords: *Fly ash, bottom ash, paving block, compressive strength, water absorption.*

Abstrak: Peningkatan kebutuhan infrastruktur mendorong tingginya penggunaan bahan konstruksi seperti semen dan pasir, yang pada akhirnya menimbulkan tekanan terhadap sumber daya alam. Sebaliknya, operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memproduksi limbah *fly ash* (FA) dan *bottom ash* (BA) dalam volume besar yang dapat mencemari lingkungan jika tidak diolah dan dimanfaatkan dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk memaksimalkan penggunaan FA dan BA sebagai pengganti semen dan pasir dalam produksi *paving block* berkelanjutan sesuai SNI 03-0691-1996. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental dengan sembilan variasi campuran, di mana FA digunakan maksimal 45% sebagai substitusi semen dan BA hingga 45% sebagai substitusi pasir. Hasil menunjukkan bahwa *paving block* normal memiliki kuat tekan maksimum 21 MPa dan penyerapan air 5,21% (mutu B). Substitusi FA 15% tanpa BA menghasilkan kuat tekan 19,99

MPa dengan penyerapan 5,88% (mutu C). Kinerja yang menurun pada kadar FABA tinggi disebabkan oleh meningkatnya porositas dan reaksi pozzolanik yang tidak sempurna, sejalan dengan hasil penelitian Babalu, R., dkk (2023) yang menunjukkan penurunan kekuatan pada kadar abu terbang di atas 30%. Variasi campuran hingga 35% FABA pada *paving block* masih dapat dimanfaatkan, meskipun hanya memenuhi standar mutu D, sehingga mendukung pengelolaan limbah yang ramah lingkungan sekaligus mengurangi eksplorasi sumber daya alam.

Kata Kunci: Fly ash, bottom ash, paving block, kuat tekan, penyerapan air.

PENDAHULUAN

PT Huadian Bukit Asam Power (HBAP) merupakan anak perusahaan dari PT Bukit Asam Tbk yang menjalani usaha pada bidang pembangkitan listrik menggunakan uap (PLTU) di kawasan Sumatera. PLTU HBAP menghasilkan 500.000 ton material *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) per tahun akibat aktivitas pembakaran batubara sebagai tenaga penggerak turbin. Berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) No. 22 2021, limbah FABA memiliki 2 (dua) kategori yaitu FABA limbah B3 dan FABA non-B3. FABA yang dikategorikan non B3 adalah FABA yang dihasilkan oleh kegiatan PLTU yang digunakan untuk menghasilkan tenaga listrik, yang pada proses pembakarannya menggunakan temperatur diatas 800°C.

Pemanfaatan FABA sangat terbuka luas dan bisa menguntungkan dari sisi ekonomi serta menjadi alternatif material untuk menekan eksplorasi penggunaan material alam dan dikategorikan sebagai material konstruksi ramah lingkungan (Ayuningtyas dkk., 2022). *Fly ash* (FA) memiliki sifat pozzolan yang substansial sebagai pengganti semen sebagian atau keseluruhan yang dapat memberikan kekuatan dan menghasilkan potensi kemampuan penyembuhan sendiri pada beton (Wiranata dkk., 2022). Sedangkan *bottom ash* (BA) dapat digunakan sebagai bahan substitusi agregat halus (Hamada dkk., 2022). Sehingga, FABA berpotensi untuk dapat digunakan sebagai bahan substitusi sebagian pada campuran material konstruksi. FA memiliki karakteristik yang mirip dengan semen, sehingga bisa digunakan sebagai pengganti sebagian semen, sementara BA memiliki sifat serupa pasir, sehingga dapat berfungsi sebagai pengganti agregat halus. Penggunaan kedua bahan pada *paving block* dapat mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam sambil memberikan nilai lebih pada limbah (Pangestuti, dkk., 2024) (Ismail, dkk., 2024).

Pemanfaatan FABA dalam beton ringan, dengan persentase FA 0%, 15%, dan 30% serta BA 0%, 25%, dan 50% (Sari dkk., 2024). Dalam penelitian tersebut menunjukkan penambahan 15% FA dan bottom ash 0%, serta bubuk aluminium sebanyak 0,2% dapat mencapai indeks kinerja beton tertinggi dengan kuat tekan 15,05 MPa pada umur 28 hari. Babalu dkk., (2023), dalam penelitiannya terhadap beton dengan *fly ash* bervolume tinggi (*high volume fly ash concrete*) menunjukkan bahwa, penambahan FA melebihi 30% dapat mengurangi kekuatan tekan dan lentur pada beton. Alterary & Marei, (2021), menunjukkan bahwa FA dapat memperkecil rongga udara pada beton karena memiliki ukuran yang sangat halus (*nansize*). FA juga digunakan untuk perbaikan tanah yang terdegradasi.

Penggunaan FABA, harus memperhatikan persentasenya agar dapat menghasilkan material konstruksi yang tetap optimal. Pemanfaatan FA lebih dari 30% cenderung menurunkan kekuatan tekan dan lentur, meningkatkan kemampuan menyerap air, serta mengurangi daya tahan terhadap aus dan benturan. Akan tetapi, beton dengan kandungan fly ash yang tinggi menunjukkan ketahanan lebih baik terhadap serangan asam, sehingga menawarkan potensi penggunaan dalam kondisi lingkungan yang agresif tertentu (Babalu, R., dkk., 2023).

Berdasarkan uraian diatas, FABA berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan tambah/ substitusi material konstruksi. Sehingga, tujuan dilakukan penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik FABA dilihat dari kuat tekan dan kemampuan menyerap air pada *paving block*, serta menganalisis rasio komposisi campuran FABA dan bahan baku lainnya yang optimal agar dapat menghasilkan paving block yang mengacu Standar Nasional Indonesia (SNI).

METODE

Penelitian ini menggunakan eksperimental di laboratorium PTBA yang bertujuan untuk mengevaluasi potensi limbah FABA sebagai bahan pengganti dalam pembuatan *paving block* dengan beberapa tahapan yaitu, tahapan persiapan dan pengujian material, persiapan benda uji, pengujian benda uji, dan tahapan analisa pembahasan.

Pengujian Material

Pengujian untuk material penyusun *paving block* terdiri dari agregat halus (pasir), semen, dan FABA yang akan mengacu pada beberapa standar spesifikasi yang menunjukkan material layak digunakan untuk *paving block* yang memenuhi mutu mengacu SNI 03-0691-1996. Pengujian material digunakan untuk mengetahui karakteristik material penyusun, yang terdiri dari;

1. Pengujian material pasir terdiri dari,
 - a. Analisa saringan, memiliki tujuan sebagai penentu bagian-bagian butir atau gradasi dari agregat yang digunakan, berdasarkan SNI 03-2834-2000.
 - b. Berat jenis, dilakukan untuk mengetahui nilai berat jenis curah (*bulk*) dan semu (*apparent*) pada pasir.
 - c. Kadar air, berguna untuk mendapatkan nilai persentase kadar air yang dikandung pasir, sehingga jumlah air yang ditambahkan pada campuran dapat disesuaikan.
2. Pengujian semen akan dilakukan pengujian berat jenis, konsistensi (Pengujian konsistensi semen yang dilakukan dilihat ketika penurunan jarum pada alat Vicat mencapai 10 mm dalam waktu 30 detik), dan waktu ikat semen (mengetahui berapa lama semen membutuhkan waktu untuk menjadi cukup keras setelah dicampur dengan air, baik untuk waktu ikat awal/ mulai kehilangan plastisitas maupun waktu ikat akhir).
3. Pada material FABA akan dilakukan pengujian analisa saringan, berat jenis, serta pengujian oksida logam, yang bertujuan untuk menentukan klasifikasi FABA, menilai potensi reaktivitas pozzolanik, dan memastikan FABA aman digunakan dalam konstruksi, karena beberapa logam berat (misalnya Pb, Cr, Hg, As) bisa berpotensi berbahaya.

Persiapan Benda Uji

Pembuatan *paving block* dilaksanakan di pabrik *paving block* yang berlokasi di pabrik briket banko PT Bukit Asam di Tanjung Enim. Pembuatan *paving block* dilakukan dengan mengikuti standar SNI 03-0691-1996 dengan komposisi campuran *paving block* 1 (semen) : 3 (pasir). Pembuatan benda uji dibuat untuk 9 jenis variasi campuran dan tiap waktu pengujian (7 hari, 14 hari, 28 hari), benda uji akan dibuat 3 sampel ditambah 1 sampel untuk pengujian penyerapan air. Sehingga, total pembuatan benda uji menjadi 90 benda uji. Benda uji pada penelitian ini akan dibuat desain dengan ukuran 20×10×8 cm.

Berdasarkan ACI 211.3R-02: *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*, rasio campuran dan penggunaan bahan material memiliki beberapa ketentuan;

1. Rentang rasio air-semen (*W/C ratio*) antara 0,25 sampai dengan 0,40 untuk beton tanpa slump seperti *paving block*. Pada penelitian ini akan digunakan rasio air-semen sebesar 0,35.

2. Penggunaan *fly ash* biasanya digunakan 15–25% dari berat semen. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian sampai dengan penggunaan *fly ash* 45% sebagai bahan substitusi semen terhadap berat semen.

Komposisi material dalam pembuatan benda uji campuran normal dan benda uji dengan bahan tambah FABA dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi perbandingan material campuran *paving block*

Kode benda uji / Variasi campuran	Rasio			
	Semen	Fly Ash	Pasir	Bottom Ash
PB1.3 [FA 0%; BA 0%]	1	-	3	-
PB1.3.15.0 [FA 15%; BA 0%]	0,85	0,15	3	-
PB1.3.25.0 [FA 25%; BA 0%]	0,75	0,25	3	-
PB1.3.35.0 [FA 35%; BA 0%]	0,65	0,35	3	-
PB1.3.45.0 [FA 45%; BA 0%]	0,55	0,45	3	-
PB1.3.15.15 [FA 15%; BA 15%]	0,85	0,15	2,55	0,45
PB1.3.25.25 [FA 25%; BA 25%]	0,75	0,25	2,25	0,75
PB1.3.35.35 [FA 35%; BA 35%]	0,65	0,35	1,95	1,05
PB1.3.45.45 [FA 45%; BA 45%]	0,55	0,45	1,65	1,35

Sumber: data penelitian

Pengujian Benda Uji

Pengujian yang dilakukan adalah pengujian benda uji *paving block* meliputi kuat tekan pada umur 7, 14, 28 hari dan penyerapan air benda uji saat telah mencapai umur 28 hari. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan pembebanan oleh mesin UTM kapasitas maksimum 2500 kN dan hasil pengujian mengacu pada SNI 03-0691-1996.

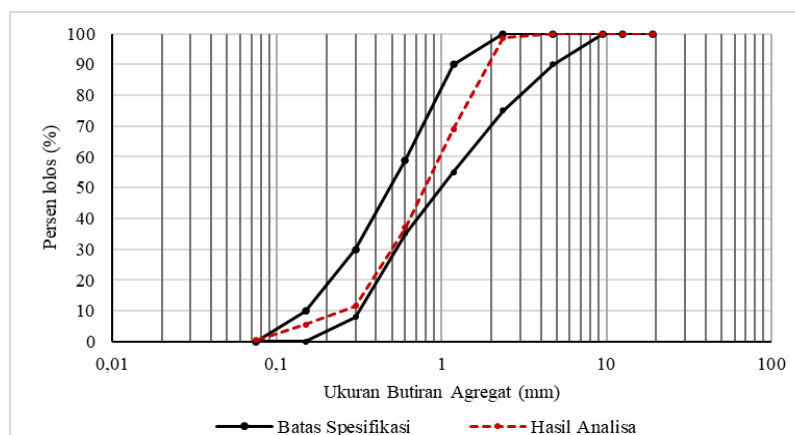
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian material digunakan untuk mengetahui karakteristik material penyusun agar layak digunakan untuk *paving block* sehingga memenuhi mutu dan spesifikasi sesuai dengan SNI 03-0691-1996.

Pengujian Pasir

1. Analisa saringan

Hasil pengujian pasir yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1 yang menunjukkan bahwa > 90% pasir yang digunakan lolos saringan No. 2,36 mm. Berdasarkan hasil tersebut, pasir dapat digunakan sebagai bahan material penyusun *paving block*. Berdasarkan Gambar 1 juga menunjukkan bahwa pasir yang digunakan masuk kedalam Zona 2 yaitu pasir sedang (ASTM C136-2012).



Sumber : hasil penelitian

Gambar 1. Grafik analisa saringan

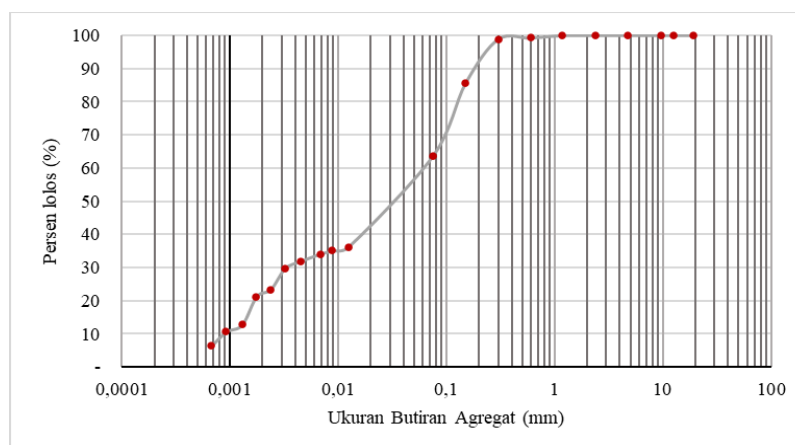
2. Berat jenis
Berdasarkan hasil pengujian didapat berat jenis kering rata-rata sebesar 2,509. Nilai tersebut memenuhi syarat standar berat jenis agregat halus berdasarkan SNI 03-1970-2008 yaitu antara 1,6 – 3,3. Hasil perhitungan penyerapan sebesar 2,104% memenuhi syarat standar penyerapan agregat halus yaitu <3 % berdasarkan SNI 03-1970-2008.
3. Kadar air
Berdasarkan hasil pengujian didapat nilai rata-rata kadar air pasir sebesar 3,853%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pasir yang digunakan memenuhi SNI ASTM C 136-2012 dengan interval 1 – 5%.

Pengujian Semen

1. Berat jenis
Nilai berat jenis semen pada penelitian ini, didapat sebesar 3,062 t/m³ dimana dinilai tersebut memenuhi nilai direntang 3.00–3.20 t/m³ berdasarkan SNI 15-2531-1991.
2. Konsistensi semen
Pengujian konsistensi semen diperlukan untuk melihat kekentalan atau kemampuan aliran pasta semen saat dicampur dengan air. Pada penelitian ini, dilihat penurunan jarum pada alat vicat menunjukkan pada skala 10 mm, air yang digunakan sebanyak 25% dari berat sampel uji 300gr.
3. Waktu ikat
Pengujian waktu ikat semen dilihat pada penurunan jarum alat vicat menunjukkan nilai 25 mm. Berdasarkan hasil penelitian, menunjukkan bahwa pada saat menit ke 115,7 terjadinya pengikatan awal semen yaitu penurunan 25 mm.

Pengujian *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA)

1. Berat jenis
Nilai berat jenis FABA berdasarkan pengujian masing-masing didapat sebesar 2,458 ton/m³ untuk *fly ash* (FA) dan 2,437 ton/m³ untuk *bottom ash* (BA).
2. Analisis saringan bottom ash
Hasil analisa saringan *bottom ash*, menunjukkan nilai modulus halus butir (MHB) yang relatif kecil yaitu 3,83. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gradasi BA bisa dipakai sebagai bahan substitusi pada pasir.
3. Hydrometer *fly ash*
Untuk melihat gradasi ukuran pada *fly ash* digunakan analisis dengan hidrometer, dimana partikel halus dari *fly ash* akan dilihat yang tersuspensi. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 2.



Sumber : hasil penelitian

Gambar 2. Grafik hidrometer *fly ash*

Berdasarkan Gambar 2, dapat dilihat bahwa gradasi FA tergolong halus dibawah saringan 100, hal ini menunjukkan bahwa FA dapat digunakan sebagai bahan substitusi pada semen.

4. Oksida logam FABA

Untuk melihat gradasi ukuran pada *fly ash* digunakan analisis dengan hidrometer, dimana partikel halus dari *fly ash* akan dilihat yang tersuspensi.

Tabel 2. Hasil pengujian Oksida Logam FABA

Parameter	Nilai (%)					Metode Pengujian
	Fly ash	Bottom ash	Spek. ASTM C618			
			Kelas			
			N	F	C	
Silikon dioksida (SiO ₂)	48,005 ± 0,141%	58,522 ± 0,152%	Min. 70	Min. 70	Min. 50	XRF
Aluminium oksida (Al ₂ O ₃)	31,013 ± 0,13%	23,142 ± 0,137%				XRF
Besi oksida (Fe ₂ O ₃)	5,347 ± 0,020%	8,202 ± 0,029%				XRF
Kalsium oksida (CaO)	8,153 ± 0,031%	6,265 ± 0,030%	report only	18	> 18	XRF
Potassium oksida (K ₂ O)	0,459 ± 0,015%	0,270 ± 0,019%	-	-	-	XRF
Sodium oksida (Na ₂ O)	1,426 ± 0,204%	0,369 ± 0,271%	-	-	-	XRF
Magnesium oksida (MgO)	2,876 ± 0,085%	1,795 ± 0,094%	-	-	-	XRF
Titanium oksida (TiO ₂)	0,952 ± 0,010%	0,967 ± 0,012%	-	-	-	XRF

Sumber: hasil penelitian

Berdasarkan Tabel 2 dan mengacu pada Permen LHK No. 19 Tahun 2021 serta ASTM C618, FABA yang digunakan termasuk ke dalam klasifikasi Kelas F. Penggunaan FABA dengan kelas F dapat menjadi efisien dan ramah lingkungan untuk mengelola limbah. Hasil pengujian juga menunjukkan kandungan silika (SiO₂) yang cukup tinggi yaitu dengan nilai 48,005 ± 0,141% pada *fly ash* dan 58,522 ± 0,152% pada *bottom ash*. Kandungan silika berpengaruh pada proses pengerasan material campuran beton yang bersifat sebagai pozzolan.

Campuran Paving Block

Penggunaan rasio air-semen (W/C ratio) sebesar 0,35 berdasarkan SNI 03-0691-1996. Penggunaan *fly ash* dari 15%; 25%; 35%; dan 45% sebagai bahan substitusi sebagian terhadap semen. *Bottom ash* yang digunakan sebagai bahan substitusi pasir digunakan 15%; 25%; 35%; dan 45%, serta pada campuran menggunakan perbandingan 1:3 antara pengikat (semen dan FA) dan agregat halus (pasir dan BA).

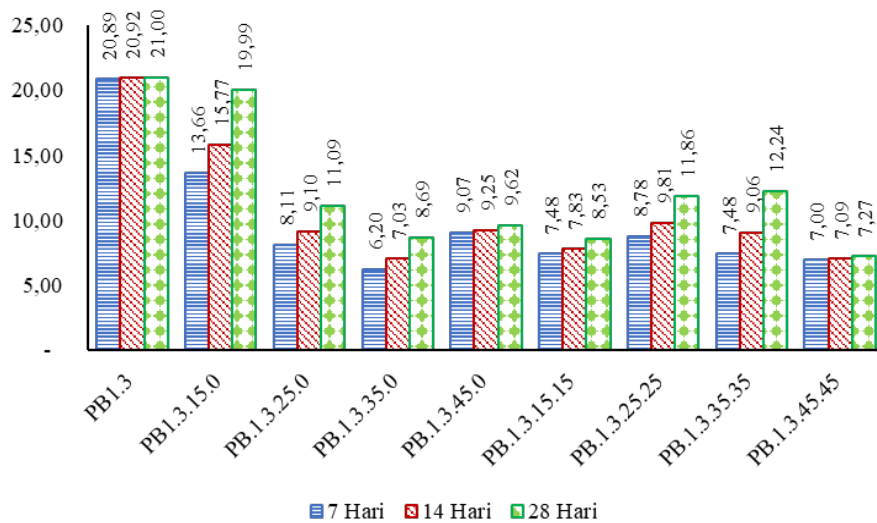


Sumber : hasil penelitian

Gambar 3. Bemda uji paving block untuk setiap variasi

Pengujian Kuat Tekan *Paving Block*

Pengujian dilakukan di Laboratorium PTBA dengan pembebanan oleh mesin UTM kapasitas maksimum 2500 kN. Hasil pengujian kuat tekan paving block untuk 9 variasi pada umur yang 7, 14, dan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 4.



Sumber : hasil analisis

Gambar 4. Grafik hasil pengujian kuat tekan paving block

Berdasarkan Tabel 4.12 dan gambar 4.7, dapat dilihat bahwa dengan adanya penambahan FABa dapat memberikan pengaruh pada kuat tekan, dimana kuat tekan dengan tambahan FABa menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah. Hasil pengujian kuat tekan *paving block* normal memiliki kuat tekan maksimum sebesar 21 MPa pada variasi PB1.3. sedangkan pada variasi *paving block* dengan campuran FABa, memiliki kuat tekan minimum 7,27 MPa pada PB1.3.45.45 dan kuat tekan maksimum sebesar 19,99 MPa pada variasi PB1.3.15.0 pada umur 28 hari. Penurunan kuat tekan yang terjadi diakibatkan dari peningkatan kadar FABa yang menyebabkan berkurangnya jumlah semen aktif dan terbentuknya pori-pori halus yang mengurangi densitas material. Hal ini sejalan dengan penelitian Babalu dkk. (2023), Sari dkk. (2024), serta Pangestuti dkk. (2024) yang menyatakan bahwa peningkatan kadar *fly ash* dan *bottom ash* di atas 30% cenderung menurunkan kuat tekan akibat reaksi pozzolanik yang tidak sempurna serta meningkatnya porositas pada matriks beton.

Pengaruh persentase penggantian sebagian semen dan pasir dengan FABa yang memenuhi standar kelas mutu *paving block* sesuai SNI berdasarkan kuat tekan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kuat tekan *paving block* berdasarkan klasifikasi mutu sesuai SNI

Kode benda uji	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)	Mutu Kelas <i>Paving Block</i>
PB1.3	21,00	B
PB1.3.15.0	19,99	C
PB1.3.25.0	11,09	D
PB1.3.35.0	8,69	D
PB1.3.45.0	9,62	D
PB1.3.15.15	8,53	D
PB1.3.25.25	11,86	D
PB1.3.35.35	12,24	D
PB1.3.45.45	7,27	—

*mutu *paving block* berdasarkan kuat tekan;

A (min. 35 MPa), B (min. 17 MPa), C (min. 12,5 MPa), D (min. 8,5 MPa)

Sumber: hasil analisis

Berdasarkan Tabel 3, campuran normal PB1.3 memenuhi syarat mutu B, yang dapat digunakan untuk lahan parkir, jalan dengan beban sedang. Pada campuran dengan pemanfaatan FABA mutu tertinggi dicapai mutu tertinggi dicapai pada persentase kandungan 15% fly ash pada pengganti semen yang dapat digunakan untuk jalan lingkungan, pejalan kaki, serta beban ringan. Sementara itu, untuk campuran lainnya hanya bisa mencapai syarat mutu D pada umur 28 hari, yang dapat digunakan untuk taman, trotoar, beban sangat ringan. Akan tetapi, pada campuran FABA dengan persentase tertinggi (45%) belum dapat memenuhi persyaratan mutu *paving block* sesuai SNI.

Dengan demikian, pemanfaatan FABA memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam pembuatan *paving block*, tetapi hanya dengan dosis terbatas ($\leq 15\%$ fly ash) agar mutu tetap mendekati standar, sedangkan pada persentase yang lebih tinggi penggunaannya lebih cocok untuk *paving block* kelas ringan seperti untuk pejalan kaki atau taman.

Pengujian Penyerapan Air *Paving Block*

Pengujian penyerapan air pada benda uji *paving block* dilakukan berdasarkan SNI 03-0691-1996 dan dilakukan setelah umur 28 hari. Pengujian dan hasil pengujian penyerapan air *paving block* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian penyerapan air *paving block*

Kode benda uji	Penyerapan Air (%)	Mutu berdasarkan penyerapan
PB1.3	5,21	B
PB1.3.15.0	5,88	B
PB1.3.25.0	7,30	C
PB1.3.35.0	6,15	C
PB1.3.45.0	6,00	B
PB1.3.15.15	6,44	C
PB1.3.25.25	5,41	B
PB1.3.35.35	8,25	D
PB1.3.45.45	12,03	–

Sumber: hasil analisis

Berdasarkan Tabel 4.14. hasil pengujian penyerapan air, terlihat bahwa variasi komposisi campuran memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap daya serap *paving block*. Campuran normal (PB1.3) memiliki penyerapan air sebesar 5,21% yang memenuhi persyaratan mutu B sesuai SNI, sedangkan variasi PB1.3.15.0 dan PB1.3.45.0 juga masih menunjukkan mutu B dengan penyerapan masing-masing 5,88% dan 6,00%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kadar *fly ash* dan *bottom ash* yang relatif rendah hingga sedang, penyerapan air masih dapat dipertahankan dalam batas mutu yang cukup baik.

Namun, pada campuran dengan persentase FABA yang lebih tinggi, penyerapan air cenderung meningkat, dapat dilihat pada variasi campuran PB1.3.25.0 dan PB1.3.35.0 yang menunjukkan penyerapan sebesar 7,30% dan 6,15% yang tergolong dalam kategori mutu C, dan PB1.3.15.15 juga termasuk dalam kategori C dengan penyerapan 6,44%. Kenaikan yang lebih signifikan muncul pada PB1.3.35.35 yang mencapai 8,25% (mutu D), serta PB1.3.45.45 yang memiliki penyerapan air tertinggi sebesar 12,03% sehingga tidak memenuhi persyaratan mutu SNI. Sejalan dengan penelitian Hamada dkk. (2022) dan Ismail & Maulida (2024), bahwa penggunaan *bottom ash* dalam jumlah tinggi dapat meningkatkan porositas dan absorpsi air karena distribusi ukuran butir yang tidak seragam dan sifat permukaan yang kasar.

KESIMPULAN

Penggunaan FABA dalam campuran *paving block* sebagai bahan pengganti sebagian semen dan pasir menunjukkan adanya pengaruh terhadap sifat fisik *paving block* akibat

karakteristik FABA. Benda uji normal (PB1.3) menunjukkan kuat tekan maksimum mencapai 21 MPa pada usia 28 hari dengan penyerapan air terendah sebesar 5,21%, sehingga menjadi standar kinerja terbaik. Substitusi FABA dalam jumlah sedikit, seperti di PB1.3.15.0, tetap dapat menghasilkan kekuatan tekan yang cukup tinggi (19,99 MPa) dengan penyerapan air yang relatif rendah (5,88%) pada umur 28 hari. Akan tetapi, penggunaan FABA yang semakin besar, terutama untuk kombinasi tinggi seperti PB1.3.45.45, menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan hingga 7,27 MPa dan peningkatan penyerapan air menjadi 12,03%. Pada kadar tertentu, FABA mampu meningkatkan efisiensi material sekaligus menjaga ketahanan terhadap serapan air, namun pada kadar tinggi cenderung menurunkan kekuatan mekanik dan memperbesar porositas.

Komposisi campuran paling optimal untuk memproduksi *paving block* yang sesuai dengan SNI Mutu B adalah dengan menggunakan FABA sebagai pengganti semen maksimal 15%, dengan atau tanpa sedikit penggantian agregat halus. Pada komposisi ini, kekuatan tekan masih hampir setara dengan nilai *paving block* normal dan kadar penyerapan air tetap dalam ketentuan standar. Di sisi lain, penggunaan FABA dengan proporsi yang lebih besar, baik sebagai substitusi semen maupun pasir, cenderung mengurangi kuat tekan secara signifikan serta meningkatkan porositas bahan. Walaupun demikian, penggunaan FABA masih bisa dimanfaatkan sampai dengan 35%, namun kualitas *paving block* yang dihasilkan hanya dapat mencapai Mutu D, sehingga lebih cocok untuk penggunaan non-struktural dengan beban ringan. Dengan cara demikian, FABA dapat dioptimalkan pemakaiannya sesuai dengan kebutuhan kualitas dan standar yang telah ditentukan.

REFERENSI

- Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University - Science*, 33(6), 101536.
- Ayuningtyas, U., dkk. (2022). Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash Sebagai Material Konstruksi Ramah Lingkungan Dalam Rangka Mendukung Kriteria Bangunan Hijau. *Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Pada Masyarakat 2022*, 51–56.
- Babalu, R., Anil, A., Sudarshan, K., & Amol, P. (2023). Compressive strength, flexural strength, and durability of high-volume fly ash concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(5), 1–13.
- Hamada, H., Alattar, A., Tayeh, B., Yahaya, F., & Adesina, A. (2022). Sustainable application of coal bottom ash as fine aggregates in concrete: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 16(April), e01109.
- Ismail, Y., & Maulida, A. (2024). Utilization bottom ash from incinerator become paving block. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering*, 1(2), 93–109.
- Sari, R. K., Rosidawani, Usman, A. P., Hanafiah, & Idris, Y. (2024). The Effects of Fly Ash and Bottom Ash on the Properties of Aerated Concrete under Density-Based Mix Design. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 34(2), 99–116.
- Pangestuti, E. K., Julianto, E. N., Ayu Hapsari, R. N., Sholahudin, F., Aida, N., Ardiasnyah, D., Bagaskara, P., & Heriyanto, F. R. (2024). Utilization of Fly Ash and Bottom Ash as a Mixture for Making Paving Blocks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1381(1).
- Wiranata, D. Y., Yang, S. H., Akgul, C. M., Hsien, H. Y., & Nugraha, M. Z. P. (2022). Use of coal ash cement stabilized material as pavement base material: Laboratory characterization and field evaluation. *Construction and Building Materials*, 344(May), 128055.