

Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran *Paving block*

Analysis of The Effect of The Use of Coal Combustion Waste as A Cement Substitution on The Use of *Paving block* Mixture

Ratna Puspita Sari¹, Rahmat Dwi Sutrisno*

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Gresik, Gresik - Indonesia

**Email: ratnapuspita372002@gmail.com*

ABSTRAK: Pemanfaatan limbah pembakaran batu bara sebagai pengganti semen dalam produksi perkerasan jalan dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk mengurangi dampak lingkungan dan biaya produksi. *fly ash*, sebagai hasil sampingan pembakaran batu bara, memiliki sifat pozzolan yang dapat meningkatkan kinerja material konstruksi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh penggunaan *fly ash* sebagai pengganti semen terhadap kuat tekan, daya serap air, dan ketahanan abrasi pada *paving stone*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* sebesar 5% menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata tertinggi sebesar 21,83 MPa (Kelas B), dibandingkan dengan 23,25 MPa (Kelas B) pada *paving stone* tanpa *fly ash*. Selain itu, penambahan *fly ash* juga menurunkan nilai keausan dengan laju keausan terendah sebesar 0,035 mm/menit pada campuran 15% (Kelas A). Daya serap air pada *paving stone* juga menurun seiring dengan meningkatnya kandungan *fly ash*. Dengan demikian, *fly ash* sebanyak 5% dapat digunakan sebagai pengganti semen untuk produksi perkerasan kelas B yang sesuai untuk area parkir. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk membandingkan *fly ash* dari berbagai sumber, mengintegrasikan bottom ash, dan meningkatkan kualitas *paving stone* melalui metode mekanis yang lebih baik. Dengan memanfaatkan *fly ash*, diharapkan dapat mengurangi akumulasi limbah, menekan emisi CO₂, dan mendukung pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi.

Kata kunci: *fly ash*, Batu Bara, Kuat Tekan, Daya Serap, Uji Aus

ABSTRACT: Utilizing coal burning waste as a cement substitute in road pavement production can be a sustainable solution to reduce environmental impacts and production costs. *fly ash*, as a byproduct of coal combustion, has pozzolanic properties that can improve the performance of construction materials. The aim of this research is to analyze the effect of using *fly ash* as a cement substitute on the compressive strength, water absorption capacity and abrasion resistance of paving stones. The research results show that the addition of 5% *fly ash* produces the highest average compressive strength value of 21.83 MPa (Class B), compared to 23.25 MPa (Class B) for paving stones without *fly ash*. Apart from that, the addition of *fly ash* also reduces the wear value with the lowest wear rate of 0.035 mm/minute at a mixture of 15% (Class A). The water absorption capacity of paving stones also decreases as the *fly ash* content increases. Thus, 5% *fly ash* can be used as a cement substitute for the production of class B hardwood which is suitable for parking areas. Further research is recommended to compare *fly ash* from various sources, integrate bottom ash, and improve the quality of paving stones through better mechanical methods. By utilizing *fly ash*, it is hoped that it can reduce waste accumulation, reduce CO₂ emissions, and support sustainable development in the construction sector.

Keywords: *fly ash, Coal, Compressive Strength, Absorption Capacity, Wear Test*

1 PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan penting untuk meningkatkan konektivitas, mendukung ekonomi, dan memperbaiki kualitas hidup. Jalan berperan dalam distribusi barang, mobilitas manusia, dan akses ke fasilitas publik. Infrastruktur yang baik mendorong investasi, mengurangi biaya logistik, serta mempercepat distribusi produk, meningkatkan daya saing daerah.

Infrastruktur jalan yang baik memfasilitasi pergerakan manusia dan barang, mendorong pertumbuhan investasi, dan menarik minat investor karena logistik yang efisien dan biaya operasional yang lebih rendah. Manfaat utamanya termasuk pengurangan biaya logistik, distribusi hasil produksi yang lebih cepat, dan peningkatan daya saing produk di pasar lokal maupun global. Selain itu, jalan yang memadai mengurangi kesenjangan antarwilayah dengan meningkatkan akses daerah terpencil ke pusat ekonomi dan layanan publik, serta mendukung pembangunan berkelanjutan melalui penggunaan teknologi ramah lingkungan dan material berkelanjutan.

Pembangunan jalan terdiri dari beberapa tahap sistematis, yaitu perencanaan, desain teknis, pembebasan lahan, konstruksi, dan pemeliharaan. Perencanaan menentukan lokasi dan kelayakan, desain teknis memilih material, pembebasan lahan memastikan lokasi, konstruksi mengikuti spesifikasi, dan pemeliharaan menjaga kualitas jalan.

Teknologi dan material berperan penting dalam efisiensi dan daya tahan jalan. Teknologi seperti *Warm Mix Asphalt (WMA)* dan *Recycling Asphalt Pavement (RAP)* mengurangi biaya, meningkatkan kualitas, dan ramah lingkungan. Material berkualitas memastikan jalan kuat dan tahan lama. Namun, tantangan seperti keterbatasan anggaran, kualitas konstruksi rendah, pembebasan lahan, serta cuaca ekstrem dan beban lalu lintas tinggi dapat menghambat pembangunan dan meningkatkan biaya pemeliharaan.

Pembangunan jalan berdampak luas secara ekonomi, sosial, dan lingkungan. Secara ekonomi, meningkatkan produktivitas, mengurangi biaya transportasi, dan mendorong investasi. Secara sosial, mempermudah akses ke layanan publik dan lapangan kerja. Namun, jika tidak dikelola baik, dapat menyebabkan erosi, deforestasi, dan pencemaran. Pembangunan jalan berkelanjutan menjadi solusi dengan menyeimbangkan ekonomi, lingkungan, dan sosial melalui teknologi ramah lingkungan, material daur ulang, sistem drainase baik, dan pengawasan ketat.

Perkerasan kaku semakin banyak digunakan karena daya tahan tinggi dan biaya pemeliharaan rendah. Namun, produksi jalan beton membutuhkan banyak semen Portland, yang berkontribusi pada pemanasan global. Proses kalsinasi dalam produksi semen melepaskan CO₂ dalam jumlah besar, menyumbang sekitar 60% dari total emisi industri semen. Setiap ton semen 3 Portland yang diproduksi akan melepaskan sekitar satu ton emisi CO₂ ke atmosfer (Sengkey et al., 2023).

Indonesia merupakan salah satu produsen batu bara terbesar di dunia, dengan produksi mencapai 419 juta ton pada 2016. Namun, tingginya produksi ini juga meningkatkan limbah pembakaran batu bara, seperti *fly ash* dan *bottom ash (FABA)*. Seiring bertambahnya PLTU berbahan bakar batu bara, produksi limbah abu batu bara pun semakin meningkat. Menurut data dari Kementerian Lingkungan Hidup (KLH), setiap ton batu bara yang dibakar akan menghasilkan limbah abu batu bara berupa *fly ash* sekitar 15%-17% dari total berat batu bara yang digunakan (Nursilawati, 2018).

Pada 2019, kebutuhan batu bara untuk PLTU di Indonesia mencapai 97 juta ton, menghasilkan sekitar 9,7 juta ton limbah *fly ash* dan *bottom ash (FABA)*. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah ini dapat mencemari udara, tanah, dan air. Namun, FABA berpotensi dimanfaatkan dalam pembuatan material konstruksi seperti beton dan *paving block*. Dengan tren konsumsi batu bara yang meningkat, kebutuhan batu bara untuk PLTU diproyeksikan mencapai 153 juta ton pada 2028. Sejalan dengan peningkatan tersebut, produksi limbah FABA diprediksi akan mencapai 15,3 juta ton (Denis, 2021).

Pengelolaan limbah batu bara, terutama *fly ash* dan *bottom ash (FABA)*, bukan hanya isu lingkungan, tetapi juga peluang menciptakan nilai tambah, khususnya dalam infrastruktur berkelanjutan. Pemanfaatan FABA dalam material konstruksi seperti *paving block* dapat mengurangi dampak negatif dan mendukung pembangunan berkelanjutan. Selain manfaat lingkungan, penggunaan *fly ash* juga mengurangi emisi karbon dari produksi semen Portland, mengurangi akumulasi limbah, serta menekan ketergantungan pada sumber daya alam yang proses produksinya berenergi tinggi dan berdampak besar pada lingkungan. Sebagai akademisi, pemikiran masa depan tentang isu lingkungan sangat ditunggu oleh masyarakat, karena kualitas lingkungan yang baik akan menghasilkan kehidupan yang baik dan berkelanjutan pula (Prafitasiwi AG, et al, 2022).

Sayangnya, pemanfaatan *fly ash* dalam konstruksi masih terbatas, meskipun memiliki sifat pozzolanik yang baik. Sifat ini memungkinkan *fly ash* bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam

Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran Paving block

beton, membentuk senyawa yang lebih stabil dan tahan lama. Dengan partikel lebih halus dari semen Portland dan sifat hidroliknya, *fly ash* berpotensi menggantikan sebagian semen dalam pembuatan beton dan *paving block*. Penggunaan *fly ash* bertujuan untuk meningkatkan karakteristik mekanis *paving block* serta mengurangi dampak lingkungan dari limbah pembakaran batu bara. Seperti pada penelitian (Sutrisno, 2022), penelitian ini juga menilai kinerja material alternatif dalam meningkatkan kekuatan struktural melalui metode eksperimen.

Penelitian terdahulu, seperti yang dilakukan oleh Winarno et al. (2019), menunjukkan bahwa *fly ash* dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton hingga kadar 50% tanpa mengurangi kekuatan struktural beton secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* bukan hanya sebagai material pengisi tetapi juga berperan aktif dalam meningkatkan kinerja beton dari segi kekuatan tekan, daya tahan, dan stabilitas struktural.

Paving block adalah produk beton pracetak yang banyak digunakan dalam proyek konstruksi, dengan permintaan yang terus meningkat, termasuk di kawasan industri seperti Gresik. Namun, produksi *paving block* berkontribusi pada emisi karbon akibat tingginya penggunaan semen.

Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi potensi penggantian sebagian semen dengan *fly ash* dalam pembuatan *paving block*. Pendekatan ini diharapkan dapat mengurangi limbah hasil pembakaran batu bara serta menekan emisi karbon dari produksi semen. Dengan demikian, penerapan *fly ash* dapat menjadi solusi lingkungan sekaligus langkah menuju pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan.

Fly ash kaya akan silika (SiO_2) dan aluminium oksida (Al_2O_3), yang memungkinkannya bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dalam kondisi lembap pada suhu kamar. Reaksi ini membentuk senyawa hidrat yang kuat dan stabil, meningkatkan kekuatan mekanis serta daya tahan *paving block* (Parkhan, 2022). Selain itu, *paving block* dengan *fly ash* dapat menjaga keseimbangan air tanah, meningkatkan stabilitas fondasi, dan mendukung penyerapan air optimal (Harystama et al., 2020).

Dari segi ekonomi, pemanfaatan *fly ash* sebagai substitusi semen dalam *paving block* memberikan efisiensi signifikan. Sebagai limbah industri yang melimpah dan bernilai ekonomi rendah, *fly ash* dapat menekan biaya produksi serta mengurangi ketergantungan pada semen Portland yang harganya fluktuatif. Dengan demikian, penggunaan *fly ash* tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga meningkatkan daya saing ekonomi produk konstruksi.

Penelitian ini menguji kualitas *paving block* dengan substitusi *fly ash* melalui tiga pengujian yaitu uji kuat tekan untuk menilai ketahanan beban,

uji daya serap air untuk mengukur penyerapan tanpa degradasi struktur, dan uji ketahanan aus untuk menilai ketahanan terhadap gesekan. Hasilnya memberikan gambaran komprehensif tentang kualitas dan daya tahan *paving block*.

Pemanfaatan *fly ash* dalam *paving block* tidak hanya mengatasi masalah lingkungan tetapi juga meningkatkan efisiensi ekonomi dan kualitas produk. Dengan pendekatan yang tepat, *fly ash* berpotensi mendukung inovasi konstruksi berkelanjutan. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menganalisis dampak jangka panjangnya, seperti pelepasan zat kimia dan potensi pencemaran air tanah, agar tetap aman bagi lingkungan.

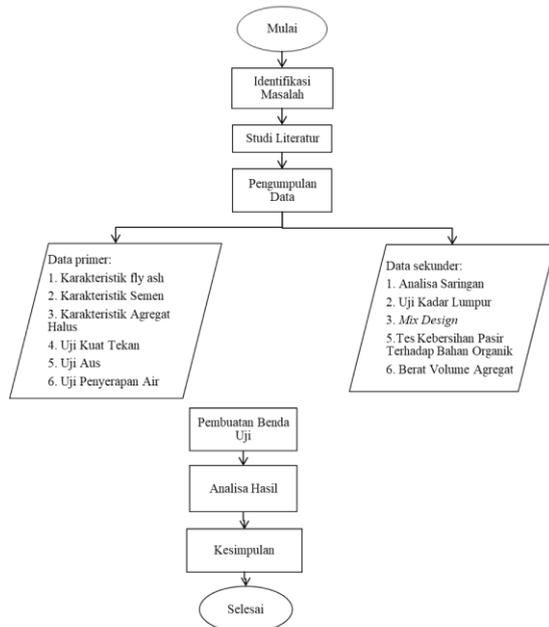
Penelitian ini diharapkan dapat mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah *fly ash* serta mengurangi ketergantungan pada semen Portland. Dengan pengelolaan yang tepat, *fly ash* dapat menjadi sumber pendapatan baru dan mendukung pembangunan berkelanjutan. Kolaborasi antara industri, akademisi, dan pemerintah diperlukan untuk memastikan pemanfaatan *fly ash* berjalan efektif. Selain itu, inovasi teknologi dalam pemrosesan *fly ash* penting untuk meningkatkan kualitas *paving block* sesuai standar nasional dan internasional.

Penelitian ini membahas penggunaan *fly ash* sebagai substitusi semen pada *paving block* dengan tujuan membandingkan nilai uji kuat tekan, daya serap air, dan ketahanan aus pada berbagai variasi campuran. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi acuan dalam pemanfaatan *fly ash* dari limbah pembakaran batu bara yang tidak terpakai. Dengan pengelolaan yang tepat, limbah ini tidak hanya mengurangi pencemaran lingkungan tetapi juga berpotensi menjadi sumber pendapatan bagi masyarakat. Selain itu, pemanfaatan *fly ash* dapat mengurangi emisi CO_2 dari produksi semen yang berlebihan.

2 METODOLOGI PENELITIAN

Langkah penyelesaian dalam artikel ini bisa dilihat pada gambar bagan alir pada gambar 2.1. Pengujian dilakukan dengan mengikuti prosedur standar untuk memastikan hasil yang akurat dan dapat diandalkan. Setiap pengujian kuat tekan *paving block* dilakukan pada umur 28 hari, dengan menggunakan 3 sampel untuk memperoleh hasil yang representatif mengenai daya tahan struktural material terhadap beban tekan. Selain itu, pengujian juga mencakup uji penyerapan air dan uji ketahanan aus, di mana masing-masing pengujian dilakukan menggunakan 1 sampel *paving block* yang dipilih secara acak dari total sampel yang tersedia.

Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran Paving block



Gambar 2.1 Diagram Alir Penelitian

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengumpulan Data Penelitian

Pengumpulan data penelitian dilakukan dengan proses observasi langsung terhadap objek penelitian, antara lain:

1. Karakteristik *Fly ash*
2. Karakteristik Semen
3. Karakteristik Agregat Halus

3.1.1 Analisis *Fly ash*

Teknik analisis yang digunakan untuk memahami serta mengidentifikasi karakteristik unsur dan kandungan oksida logam berat dalam limbah padat berupa *fly ash* adalah dengan memanfaatkan instrumen kimia canggih seperti *X-Ray Fluorescence (XRF)*.

Tabel 3.1 Hasil Analisis XRF *fly ash*

Parameter	Test Result (%)
SiO ₂ (Silicon Dioxide)	49.05
Al ₂ O ₃ (Aluminium Oxide)	17.30
Fe ₂ O ₃ (Iron Trioxide)	15.64
CaO (Calcium Oxide)	6.70
MgO (Magnesium Oxide)	2.70
Na ₂ O (Sodium Oxide)	0.52
K ₂ O (Potassium Oxide)	1.27
TiO ₂ (Titanium Oxide)	0.65
MnO ₂ (Manganese Dioxide)	0.15
Cr ₂ O ₃ (Chromium Trioxide)	0.02
P ₂ O ₅ (Diphosphorus pentoxide)	0.33
SO ₃ (Sulphur Trioxide)	2.72
Loss On Ignition (LOI)	2.49

3.1.2 Analisis Semen

Pengujian kehalusan dan berat jenis semen bukan hanya sekedar prosedur teknis, tetapi merupakan langkah strategis dalam memastikan kualitas, kekuatan, dan durabilitas *paving block*.

1. Hasil pengujian kehalusan semen

Pengujian kehalusan semen ini mengacu pada SNI 03-6827-2002. Hasil pengujian kehalusan semen dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Hasil Pengujian Kehalusan Semen

Uraian	Hasil Uji	Satuan
Berat contoh mula – mula	100.00	gram
Berat tertahan saringan no.100 (w 100)	0.00	gram
Berat tertahan saringan no. 200 (w 200)	0.67	gram
Kehalusan		
Lolos saringan no. 100 (= P 100)	100.00	%
Lolos saringan no. 200 (= P 200)	99.33	%

Berdasarkan Tabel dapat dilihat bahwa hasil pengujian kehalusan semen dengan nilai kehalusan lolos saringan no. 100 sebesar 100.00% dan pada lolos saringan no. 200 sebesar 99.33%.

2. Hasil pengujian berat jenis semen

Pengujian berat jenis semen ini mengacu pada SNI 15-2049-2004. Hasil pengujian berat jenis semen dapat dilihat pada tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3.3 Hasil Pengujian Berat Jenis Semen

Percobaan	Satuan	Semen
Berat semen (W1)	gram	64.00
Berat semen + minyak + labu takar (W2)	gram	356.16
Berat minyak + labu takar (W3)	gram	292.38
Bacaan awal (V1)	Cm ³	0.00
Bacaan akhir (V2)	Cm ³	20.25
Berat jenis = (W2 – W3/ V2)	t/m ³	3.15

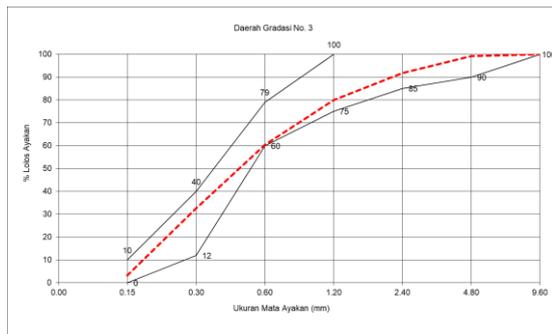
Berdasarkan tabel 3.3 dapat dilihat bahwa hasil pengujian berat jenis semen dengan nilai berat jenis sebesar 3.15 t/m³.

3.1.3 Analisis Agregat Halus

Penelitian ini menggunakan pasir dari Lumajang dan menguji material pasir melalui analisis saringan atau Modulus Halus Butir (MHB), berat jenis, penyerapan air, kadar lumpur, dan kandungan kotoran organik. Fungsi dari agregat ini yaitu mengurangi deformasi permanen dan memberikan stabilitas pada campuran lewat gesekan partikel dan interlocking (Ayunaning, K., & Juliati, K., 2022)

Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran Paving block

- Hasil pengujian analisis saringan / Modulus Halus Butir (MHB)
Gradasi agregat halus menurut BS dan SK.SNI T-15-1990-03.
Kekasaran pasir dibagi atas 4 zona:
Zona/daerah 1: Pasir kasar
Zona/daerah 2: Pasir agak kasar
Zona/daerah 3: Pasir agak halus
Zona/daerah 4: Pasir halus
Dari hasil pengujian dapat digambarkan grafik gradasi agregat halus pada gambar berikut.



Gambar 3.1 Nilai Batas Gradasi Agregat Halus Daerah 3

Berdasarkan gambar 3.1 gradasi pasir lumajang masuk dalam zona III yaitu pasir dengan ukuran butiran agak halus.

- Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus
Pengujian dilakukan sesuai standar SNI 1970-2008, dengan hasil lengkap disajikan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Pasir Lumajang

No	Uraian	Agregat Halus	Satuan
1	Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD)	500	gram
2	Berat benda uji kering oven	498.35	gram
3	Berat piknometer diisi air (25°C)	1250.30	gram
4	Berat piknometer + benda uji + air (25°C)	1566.95	gram
5	Berat jenis (<i>bulk</i>)	2.718	t/m ³
6	Berat jenis kering permukaan jenuh	2.727	t/m ³
7	Berat jenis semu (<i>Apparent</i>)	2.743	t/m ³
8	Penyerapan	0.331	%

- Hasil pemeriksaan kotoran organik pada agregat halus
Pengujian kotoran organik agregat halus ini mengacu pada SNI 2816 – 2014.
Data material:

Berat agregat halus : 1000 gram
Berat NaOH : 3 gram (larutan 3% NaOH)
Dicampur air 200 cc kemudian didiamkan selama 24 jam. Hasil pemeriksaan kotoran organik pada agregat halus adalah **BENING**.



Gambar 3.2 Hasil Pengujian Kadar Organik Agregat Halus

- Hasil pemeriksaan kadar lumpur pada agregat halus
Menurut standar PUBI-1982, kandungan lumpur pada pasir tidak boleh melebihi batas atas yaitu 5%.

Tabel 3.5 Hasil Pemeriksaan Kadar Lumpur pada Agregat Halus

No	Uraian	Berat Agregat	Satuan
1	Berat Tempat	151.9	gram
2	Berat Pasir Awal (B1)	250	gram
3	Berat Pasir setelah dioven (B2)	239.5	gram
4	%Kadar Lumpur	4.2	%

3.2 Persiapan Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain agregat halus, semen, air, dan bahan tambahan berupa abu terbang (*fly ash*). Sedangkan peralatan yang digunakan antara lain cetakan paving batu seperti di bawah ini:

- Wadah/cawan
- Alat pengaduk
- Cetakan benda uji dan alat-alat bantu lain untuk pencetakan dan pemadatan benda uji
- Mesin uji tekan
- Mesin uji aus
- Labu ukur
- Pipet
- Timbangan
- Ayakan
- Oven

3.3 Analisa Hasil Penelitian

3.3.1 Perhitungan Komposisi Campuran

Penelitian ini menggunakan *paving block* dengan ukuran yaitu 20 cm x 10 cm x 6 cm. *paving block* dibuat dengan komposisi perbandingan

Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran Paving block

semen: pasir sebesar 1:3 dengan penambahan *fly ash* sebagai substitusi semen sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat pasir. Pada campuran ini diberikan kode FA1, FA2, FA3, FA4, dan FA5. Rincian komposisi *fly ash* sebagai pengganti semen dapat dilihat pada tabel 3.6 sebagai berikut:

Tabel 3.6 Komposisi Campuran Pasir dan *fly ash*

Campuran	Pasir (%)	Semen (%)	<i>Fly ash</i> (%)
FA 1	80	20	0
FA 2	80	15	5
FA 3	80	10	10
FA 4	80	5	15
FA 5	80	0	20

Perhitungan kebutuhan bahan untuk setiap benda uji adalah sebagai berikut ini.

$$\begin{aligned} \text{Volume Paving} &= 20 \times 10 \times 6 \text{ cm} \\ &= 1200 \text{ cm}^3 \\ \text{Berat Jenis Pasir} &= 2.729 \text{ t/m}^3 \\ \text{Berat Jenis fly ash} &= 2.78 \text{ t/m}^3 \\ \text{Berat Jenis Semen} &= 3.15 \\ \text{Faktor Pematatan} &= 1,3 \\ \text{Faktor Air Semen} &= 0,35 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan pasir untuk 1 paving block} &= \frac{6}{7} \times \text{Berat isi pasir} \times V \text{ paving block} \times 1,3 \\ &= \frac{6}{7} \times (\text{Berat Jenis} \times \text{presentase kebutuhan pasir}) \\ &\times V \text{ paving block} \times 1,3 \\ &= \frac{6}{7} \times (2.729 \times 80\%) \times \left(\frac{1200}{1000000}\right) \times 1,3 \\ &= 0.00291 \text{ ton} \\ &= 0.00291 \times 1000 \\ &= 2.91 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan pasir untuk 6 paving block} &= 6 \times 2.91 \text{ kg} \\ &= 17.52 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan semen untuk 1 paving block} &= \frac{\text{kebutuhan pasir}}{3} \\ &= \frac{2.91}{3} \\ &= 0.97 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan semen untuk 6 paving block} &= 6 \times 0.97 \text{ kg} \\ &= 5.84 \text{ kg} = 5.84 \times 1000 = 5840 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Air untuk 1 paving block} &= 0.35 \times \text{kebutuhan semen} \\ &= 0.35 \times 1 \\ &= 0.35 \text{ Liter} \\ &= 0.35 \times 1000 \\ &= 350 \text{ Mililiter} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Air untuk 1 paving block} &= 6 \times 0.35 \text{ Liter} \\ &= 2.1 \text{ Liter} = 2.1 \times 1000 = 2100 \text{ Mililiter} \end{aligned}$$

Contoh perhitungan penambahan *fly ash* variasi 5% dari berat semen:

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan fly ash 5\% untuk 1 paving block} &= \text{kebutuhan semen penuh} - \text{kebutuhan semen dibutuhkan} \\ &= 0.973 - 0.730 \\ &= 0.243 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan fly ash 5\% untuk 6 paving block} &= 6 \times 0.243 \\ &= 1.458 \text{ gram} \end{aligned}$$

Kebutuhan komposisi semen, pasir dan *fly ash* dalam pembuatan *paving block* pada penelitian ini dapat ditampilkan pada tabel 3.7 sebagai berikut.

Tabel 3.7 Komposisi Campuran *Paving Block* Metode Mekanis

Varia si	Pasir (gram)	Seme n (gram)	Air (gram)	<i>Fly ash</i> (gram)	Jumla h benda uji (buah)
FA1	17520	5839	2100	0	6
FA2	17520	4379	2100	1459	6
FA3	17520	2189	2100	3649	6
FA4	17520	547	2100	5291	6
FA5	17520	0	2100	5839	6

3.3.2 Jumlah Benda Uji *Paving block*

Jumlah kebutuhan benda uji disesuaikan dengan jumlah pengujiannya yang akan dilakukan dan komposisi *fly ash* yang akan digunakan. Berikut adalah jumlah kebutuhan benda uji berdasarkan banyak campuran dan jenis pengujian.

Tabel 3.8 Kebutuhan Jumlah Benda Uji

Jenis Pengujian	Umur <i>paving block</i>	Komposisi <i>fly ash</i> (%)				
		0	5	10	15	20
Uji Kuat Tekan	28	3	3	3	3	3
Uji Aus Uji Penyerapan Air	28	1	1	1	1	1
Sub-total		5	5	5	5	5
Total						25

3.4 Pembuatan Benda Uji

Berikut merupakan langkah-langkah pembuatan benda uji *paving block*:

1. Menyiapkan cetakan yang akan digunakan

Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran Paving block



Gambar 3.3 Cetakan Paving Block

2. Menimbang masing-masing bahan
3. *Mix design*
 Pada tahap ini akan ditetapkan rencana campuran paving block untuk mendapatkan paving block dengan kekuatan yang tinggi, mudah dikerjakan (*workable*), tahan lama, murah, tahan aus. Oleh karena itu harus direncanakan dengan teori perancangan proporsi campuran adukan paving block. Dengan metode rancangan paving block ini akan didapatkan paving block yang memenuhi syarat teknis dan ekonomis.
4. Material paving block ditimbang dan dicampurkan dengan menggunakan tangan atau mesin pengaduk (*mixer*)



Gambar 3.4 Mixer

3.5 Perawatan Benda Uji

Untuk memastikan hasil pengujian yang optimal, paving block harus segera menjalani proses perawatan dengan cara direndam dalam air. Perendaman ini bertujuan untuk menjaga kelembaban yang dibutuhkan selama proses hidrasi semen agar kekuatan dan kualitas paving block dapat tercapai sesuai standar. Sehari sebelum dilakukan pengujian, paving block diangkat dari dalam air dan ditiriskan untuk memastikan permukaannya dalam kondisi siap untuk diuji.

3.6 Pengujian Paving block

Pengujian paving block terdiri dari tiga aspek utama: kuat tekan untuk menilai kemampuan menahan beban, daya serap air untuk mengukur ketahanan terhadap penyerapan air, dan keausan untuk mengevaluasi ketahanan terhadap gesekan atau abrasi.

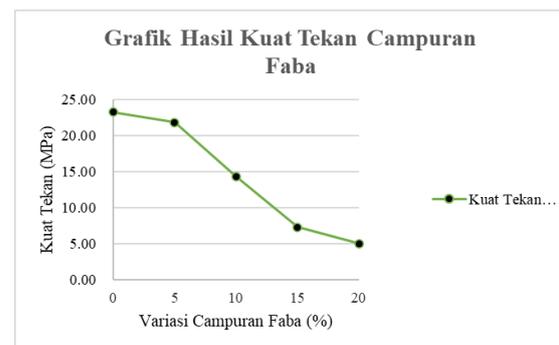
3.6.1 Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan di Laboratorium Bahan dan Beton Universitas Muhammadiyah Gresik setelah paving block mencapai umur 28 hari dalam keadaan kering dengan benda uji sebanyak 3 buah untuk masing-masing variasi dari 5 variasi metode konvensional yang nantinya ada 15 sampel yang diuji kuat tekan. Hasil pengujian kuat tekan paving block menggunakan metode mekanis dapat dilihat pada tabel 3.9 berikut ini.

Tabel 3.9 Hasil Uji Kuat Tekan Rata-Rata Paving Block

Variasi fly ash (%)	Kode	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata – Rata (MPa)
FA1	N1	26.25	23.25
	N2	19.50	
	N3	24.00	
FA2	FA1	25.50	21.83
	FA2	19.25	
	FA3	20.75	
	FA4	12.50	
FA3	FA5	15.75	14.33
	FA6	14.75	
	FA7	8.00	
FA4	FA8	8.75	7.25
	FA9	5.00	
	FA10	5.00	
FA5	FA11	5.00	5.00
	FA12	5.00	

Berdasarkan tabel 3.9, dapat diketahui bahwa grafik hasil kuat tekan rata-rata paving block metode konvensional pada masing – masing variasi dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 3.5 Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Paving Block

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan fly ash sebagai bahan pengganti sebagian semen memiliki potensi untuk diaplikasikan dalam produksi paving block. Namun, proporsi yang digunakan harus dioptimalkan untuk menghindari penurunan kuat tekan yang signifikan. Rekomendasi dari (Bagus, 2023) menyarankan agar penelitian lanjutan difokuskan pada penyesuaian komposisi material dan teknik produksi agar paving block dengan campuran fly ash dapat mencapai

Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran Paving block

performa yang setara atau bahkan lebih baik dibandingkan dengan *paving block* standar. Dengan pendekatan yang lebih sistematis dan kontrol kualitas yang ketat, diharapkan *paving block* dengan substitusi *fly ash* dapat menjadi solusi yang lebih ekonomis dan berkelanjutan.

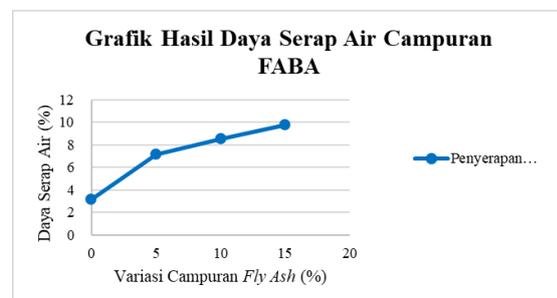
3.6.2 Uji Penyerapan Air

Pengujian penyerapan air pada *paving block* dilakukan dengan cara merendam sampel selama 24 jam, kemudian dikeringkan pada suhu 110°C selama 24 jam. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa *paving block* mencapai kondisi jenuh air dan benar-benar kering sebelum dilakukan pengukuran. Sampel yang diuji berumur 28 hari, yang merupakan umur optimal untuk mendapatkan kekuatan dan kestabilan struktur material beton. Pengujian ini melibatkan lima variasi campuran, di mana setiap variasi memiliki satu sampel yang diuji untuk memastikan konsistensi hasil. Hasil lengkap dari pengujian ini disajikan dalam tabel, yang memperlihatkan bagaimana setiap variasi campuran memengaruhi daya serap air *paving block* serta apakah nilai tersebut memenuhi persyaratan standar yang berlaku.

Tabel 3.10 Klasifikasi Hasil Uji Penyerapan Mutu *Paving Block*

No	Variasi Campuran <i>fly ash</i>	Presentase Penyerapan Air (%)	Mutu <i>paving block</i>	Batas Maksimal (%)
1	FA1	3	A	3
2	FA2	7	C	8
3	FA3	9	D	10
4	FA4	10	D	10
5	FA5	-	-	-

Berdasarkan Tabel 3.10, grafik hasil pengujian daya serap air pada masing-masing variasi dapat dilihat pada gambar 3.6 berikut. Grafik ini menyajikan visualisasi yang lebih jelas mengenai perbedaan daya serap air pada setiap variasi *paving block* dengan proporsi *fly ash* yang berbeda sebagai substitusi sebagian semen.



Gambar 3.6 Grafik Hasil Pengujian Daya Serap Air

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dapat memengaruhi sifat

serapan air *paving block* secara signifikan. Oleh karena itu, pemilihan rasio *fly ash* yang tepat sangat penting untuk memastikan *paving block* memiliki keseimbangan antara kekuatan struktural, kepadatan, dan daya serap air yang optimal. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan proporsi terbaik dalam penggunaan *fly ash*, serta memperbaiki metode pencampuran dan pemadatan untuk mengurangi jumlah rongga dan meningkatkan kinerja *paving block* dalam berbagai kondisi lingkungan.

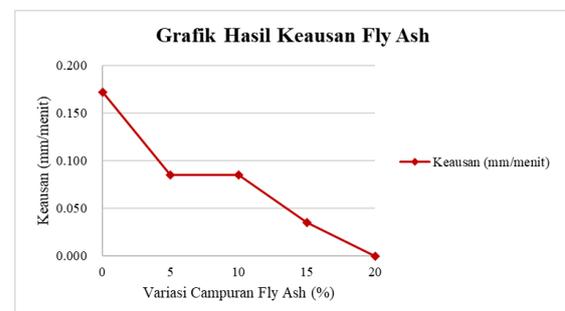
3.6.3 Uji Aus

Pengujian ketahanan *paving block* dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, setelah *paving block* mencapai umur 28 hari. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana material *paving block* mampu menahan keausan akibat gesekan dan beban berulang selama pemakaian. Untuk setiap variasi campuran, enam sampel *paving block* diuji sesuai dengan standar yang telah ditetapkan dalam SNI 03-0691-1996 tentang spesifikasi teknis untuk *paving block*. Hasil pengujian yang disajikan dalam Tabel 3.11 memberikan gambaran mengenai performa masing-masing variasi campuran dalam menahan keausan.

Tabel 3.11 Hasil Perhitungan Keausan Rerata dan Klasifikasi Mutu *Paving Block* Tiap Variasi *Fly Ash*

No	Variasi Campuran <i>fly ash</i>	Keausan Rata - Rata (mm/menit)	Mutu <i>paving block</i>	Fungsi <i>paving block</i>
1	FA1	0.172	C	Pejalan Kaki
2	FA2	0.085	A	Jalan
3	FA3	0.085	A	Jalan
4	FA4	0.035	A	Jalan
5	FA5	-	-	-

Berdasarkan tabel 3.11, grafik hasil pengujian keausan pada masing – masing variasi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3.7 Grafik Hasil Uji Keausan *Paving Block*

Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran Paving block

Maka dapat disimpulkan bahwa pengganti sebagian semen menggunakan *fly ash* dapat mempengaruhi nilai uji keausan *paving block*.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan hasil penelitian yang dilakukan mengenai *paving block* dengan *fly ash* sebagai substitusi semen mendapatkan kesimpulan untuk menjawab rumusan masalah sebagai berikut.

1. Pengujian Kuat Tekan

Hasil penelitian ini mendapatkan nilai kuat tekan rata-rata tertinggi pada *paving block* yaitu pada variasi 5% dengan kadar *fly ash* 5% sebagai bahan substitusi semen sebesar 21.83 Mpa dengan mutu B yang bisa dimanfaatkan sebagai pelataran parkir. Tapi nilai campuran pada variasi 5% ini tidak lebih tinggi dari nilai campuran 0% kadar *fly ash* 0% dengan nilai uji sebesar 23.25 Mpa. Maka dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan *fly ash* sebagai substitusi semen pada uji kuat tekan cenderung menurun.

2. Pengujian Keausan

Hasil penelitian ini mendapatkan nilai aus terendah ada pada campuran 15% dengan nilai 0.035 mm/menit, yang termasuk dalam kategori mutu A. Sedangkan untuk campuran dengan nilai tertinggi ada pada campuran 0% dengan nilai 0.172 mm/menit, yang termasuk dalam kategori mutu C. Maka dapat disimpulkan bahwa dengan menambahkan *fly ash* sebagai substitusi semen pada uji aus cenderung dapat menambah mutu *paving block*.

3. Pengujian Penyerapan Air

Hasil dari penelitian ini mendapatkan nilai pengujian penyerapan air pada *paving block* akan berkurang daya serap air pada penambahan kadar *fly ash* dan dapat ditarik kesimpulan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai substitusi semen dapat mengurangi daya penyerapan air *paving block* di setiap penambahan persentase *fly ash*.

DAFTAR PUSTAKA

Azis, A. (2022). *Pemanfaatan Abu Ampas Tebu Dalam Pembuatan paving block*.
Bayuaji, R. (1973). *Utilization Of The Use of fly ash And Bottom Ash as a Pozzolan at the Binder Geopolymer D-IV Program of Civil Engineering in Advanced (Extended) Level Structure Building Department Faculty of Civil Engineering and Planning Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2017*.
Bidin A. (2017). *Keselamatan Lingkungan Tahan Resonansi Dengan Beton Ringan Bahan Styrofoam*.
Chandra, M. R., Mangangka, I. R., & Windah, R. S. (2024). *Pemanfaatan fly ash Dari PLTU-3 SULUT Untuk Substitusi Sebagian Semen Pada Produksi paving block*. 22(87).

Fadhilah, D., & Prasanti, N. (2023). *Analisa Nilai Ekonomi Produk paving block Dari Pemanfaatan Limbah Non-B3 fly ash Dan Bottom Ash Di PT. ABC, Nagan Raya: Vol. V*.
Harystama, A., Al Fathoni, M. A. S., & Azizi, A. (2020). *Pengaruh Penambahan Abu Terbang (Fly ash) Terhadap Kuat Tekan paving block*. *CIVeng: Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 1(1), 11–16. <https://doi.org/10.30595/civeng.v1i1.9287>
Linna Sengkey, S., Efraty Kandiyoh, G., Berty Slat, V., & Hombokau, C. (2022). *Pengaruh Substitusi Semen Portland terhadap Kinerja Paving Blok Geopolimer Berbahan Dasar fly ash Tipe F*. *Prosiding Seminar Nasional Produk Terapan Unggulan Vokasi*, 1(2), 76–84.
Nursilawati, L. I. (2018). *Pemanfaatan Limbah Batu Bara (Fly ash) sebagai Pengganti Sebagian Semen pada paving block*. *Teknik Sipil*.
Parkhan, A., & Sugarindra, M. (2022). *Kualitas Mekanis Kain Tenun Menggunakan Metode Vikor Optimal Design of Woven Fabric Mechanical Quality Using Vikor*. *Jurnal Disprotek*, 13(2), 137–145. <https://doi.org/10.34001/jdpt.v12i2>
Sengkey, S. L., Kandiyoh, G. E., & Slat, V. B. (2023). *Rekayasa Desain Sifat paving block Geopolimer Berdasarkan fly ash dengan Bottom Ash sebagai A Substitusi Pasir*.
Setiawati, M., & Imaduddin, M. (2018). *fly ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton*.
Soleh, M., Hidayat, Y., & Abidin, Z. (2019). *Development of Coal Fired Power Plant Aging fly ash and Bottom Ash Utilization. 2019 International Conference on Technologies and Policies in Electric Power and Energy, TPEPE 2019*.
Sudjatmiko, A., & Kholis, H. (2022). *fly ash Sebagai Substitusi Semen Pada paving block Terhadap Pengujian Kuat Tekan Dan Daya Serap Air Dengan Penekanan Menggunakan Desak Pyramid*. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2022*, 37–42.
Winarno, H., Muhammad, D., & Wibowo, Y. G. (2019). *Pemanfaatan Limbah fly ash Dan Bottom Ash Dari Pltu Sumsel-5 Sebagai Bahan Utama Pembuatan paving block*. *Jurnal Teknika*, 11(1), 1067. <https://doi.org/10.30736/jt.v11i1.288>
Ayunaning, K., & Juliati, K. (2022). *Pemanfaatan Bahan Pengisi Limbah Kerang pada Lapisan Perkerasan Menggunakan Lapen (Macadam Penetration Layer)*. *Procedia of Engineering and Life Science*, 2 (2).
Sutrisno, RD (2022). *Studi Perilaku Geser Elemen Balok Beton Bertulang Dengan Tulangan Glass Fiber Reinforcement Polimer (GFRP)*

Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran Paving block

Dengan Simulasi Numerik

3DNLFEA (Disertasi Doktor, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).

Prafitaswi, AG, Rohman, MA, & Ongkowijoyo, CS (2022). Kesadaran penghuni untuk mencapai efisiensi energi di gedung kampus. *Hasil dalam Teknik, 14*, 100397.