

Dampak Penambahan Fly Ash Batu Bara Terhadap Kinerja Balok Beton Bertulang Tunggal

Yulinda Sukmawati^{1*}, Muhtar², Hilfi Harisan Ahmad³

¹Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jember
Jl. Karimata No.49 Jember 68121 Jawa Timur

*E-mail Korespondensi : yulindasukmawati17@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v17i2.25784>

Submitted September 14th 2023, Accepted February 27th 2024, Published August 15th 2024

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton merupakan industri yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar. Salah satu limbahnya adalah *fly ash*. *Fly ash* dapat dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian semen karena memiliki sifat *pozzolan*. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan *fly ash* batu bara terhadap kapasitas lentur, kekakuan, daktilitas, pola retak dan keruntuhan balok beton bertulang tunggal. Benda uji terdiri dari lima buah silinder dan lima buah balok dengan variasi proporsi campuran 0% *fly ash*, 5% *fly ash*, 10% *fly ash*, 15% *fly ash* dan 20% *fly ash*. *Fly ash* yang digunakan adalah kategori tipe C. Balok diuji dengan metode teknik empat titik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa balok dengan proporsi campuran 15% *fly ash* mempunyai kinerja lebih tinggi dari proporsi campuran yang lain. Kapasitas lentur balok dengan 15% *fly ash* meningkat sampai 18,96%, daktilitas meningkat sampai 2,74% dan kekakuan menurun sampai 24,44% dari beton normal atau 0% *fly ash*. Sedangkan pola retak dan keruntuhan balok dengan *fly ash* mempunyai pola yang sama dengan beton normal.

Kata Kunci: balok, *fly ash*, beton, batu bara, PLTU Paiton

Abstract

The Paiton Steam Power (PLTU) is an industry that uses coal as fuel. One of the wastes is fly ash. Fly ash can be used as a partial replace cement because it has pozzolanic properties. The aim of this research is to determine the effect of adding coal fly ash on the flexural capacity, stiffness, ductility, crack patterns and failure of single reinforced concrete beams. The test objects consisted of five cylinders and five beams in the proportions of 0% fly ash, 5% fly ash, 10% fly ash, 15% fly ash and 20% fly ash. The fly ash used is type C category. The beam testing uses a four-point loading method. Test results showed that beams containing 15% fly ash have higher performance than other proportions. The flexural capacity of beams containing 15% fly ash increases to 18.96%, ductility increases to 2.74% and stiffness decreases to 24.44% of normal concrete or 0% fly ash. The crack and failure patterns of beams in the proportion fly ash have the same pattern as normal concrete.

Key words: beam, fly ash, concrete, coal, PLTU Paiton

PENDAHULUAN

Aktivitas pembakaran batu bara memiliki dampak buruk bagi lingkungan yang menghasilkan banyak limbah padat salah satunya *fly ash* (Diana & Subaidillah, 2020). *Fly ash* yang dihasilkan akibat proses pembakaran dapat mencapai 15%-17% per satu ton (Sani & Susanti, 2020). Salah satu industri yaitu PLTU Paiton melibatkan batu bara untuk sumber energi (Klarens *et al.*, 2016). Penggunaan batu bara yang dibutuhkan PLTU Paiton yaitu ± 250 ton (Khasanah & Arief, 2022). Produk limbah yang dihasilkan diantaranya 75% abu terbang (*fly ash*) dan 25% *bottom ash* (Klarens *et al.*, 2016; Khasanah & Arief, 2022). Usaha memanfaatkan limbah hasil pembakaran batu bara terus berkembang salah satunya dengan menggunakan limbah padat *fly ash* sebagai campuran semen (Ngudiyono *et al.*, 2022). *Fly ash* batu bara memiliki kandungan alumina, silika, CaO dan beberapa oksida logam yang dapat menghasilkan pembentukan semen jika bereaksi dengan air (dapat dijadikan pengganti sebagian semen) (Priyatham *et al.*, 2021).

Kandungan silika yang berada pada *fly ash* batu bara dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (proses hidrasi dari CaO) yang akan menghasilkan kalsium silika hidrat (C-S-H) (Yao *et al.*, 2015; Kar, 2022). Secara global *fly ash* batu bara telah digunakan dalam pembuatan beton, yang mana campuran *fly ash* batu bara pada beton akan membentuk komponen sebagian campuran semen atau dapat langsung sebagai elemen *independent* (Chinh, 2021). Contoh bangunan luar negeri yang merupakan hasil

pemanfaatan *fly ash* batu bara dalam beton adalah *Sunshine Skyway* (Florida), Bendungan Tiga Ngarai (Cina) dan *Burj Khalifa* (Dubai) (Kar, 2022).

Konstruksi menjadi salah satu kegiatan pembangunan yang sering dilakukan pada pembuatan seperti gedung, terowongan, pengerasan jalan, jembatan dan lain sebagainya (Afrilia et al., 2023). Salah satu bahan material terpenting pada pembangunan yaitu beton (Muharram & Eko, 2021). Berdasarkan fungsi strukturalnya, beton memiliki beberapa jenis salah satunya beton bertulang (Pujantara, 2014). Beton bertulang (*Reinforced Concrete*) merupakan perpaduan dari beton yang bersifat kuat terhadap beban tekan dan baja tulangan bersifat kuat terhadap beban tarik (Marulitua et al., 2022). Pada dasarnya beton lemah untuk menahan kuat tarik dan kuat menahan beban tekan sehingga pada asumsi perencanaan balok bertulang tunggal digunakan tulangan baja sebagai pemikul beban tarik (Simanjuntak & Saragi, 2021). Sedangkan untuk asumsi perencanaan balok bertulang rangkap digunakan tulangan baja sebagai pemikul beban tekan dan tarik yang mana beton menerima bantuan untuk menahan gaya tekan (Wight & MacGregor, 2015). Namun penggunaan balok bertulang rangkap membutuhkan lebih banyak biaya (Sani & Susanti, 2020).

Beberapa penelitian telah menggunakan *fly ash* batu bara sebagai pengganti sebagian semen yang dapat membantu mengurangi emisi gas CO₂ pada pabrik semen, Menurut Ngudiyono et al., (2022), penggunaan *fly ash* batu bara dengan variasi 15% memiliki nilai kuat tekan tertinggi pada beton SCC (*Self Compaction Concrete*) dengan benda uji silinder pada umur 28 hari sebesar 27,9 MPa. Menurut Muharram & Eko (2021), uji eksperimen beton dengan menggunakan *fly ash* batu bara sebagai substitusi semen pada benda uji silinder umur 14 hari menunjukkan bahwa variasi 15% mengalami kenaikan kuat tekan sebesar 11,61 MPa. Penggunaan *fly ash* batu bara sebagai substitusi semen pada benda uji kubus umur 28 hari menunjukkan bahwa variasi 12,5% mengalami kenaikan kuat tekan sebesar 404,03 Kg/cm² (Setiawati, 2018). Pengujian pada benda uji balok beton bertulang rangkap umur 28 hari juga telah dilaporkan oleh Raj & Rao, (2023), menyatakan bahwa campuran *fly ash* batu bara dengan konsentrasi 30% (*containing 400 kg/m³ of cement*) memiliki nilai tertinggi beban *ultimate* yaitu 160.3 kN.

Dengan memanfaatkan limbah padat *fly ash* batu bara sebagai campuran atau substitusi semen pada beton dapat dilakukan pengujian seperti halnya yang telah dilakukan oleh Ngudiyono et al., (2022) pada silinder, Muharram & Eko (2021) pada silinder, (Setiawati, 2018) pada kubus dan (Raj & Rao, 2023), balok beton bertulang rangkap. Berdasarkan hal tersebut maka perlu dilakukan suatu penelitian terkait pengaruh penambahan *fly ash* batu bara terhadap kinerja balok beton bertulang tunggal. Penelitian pengaruh penambahan *fly ash* batu bara pada balok beton bertulang tunggal perlu dilakukan untuk mendapatkan informasi variasi yang tepat dalam penggunaan limbah *fly ash* batu bara sebagai campuran semen.

METODE PENELITIAN

Persiapan Bahan Material

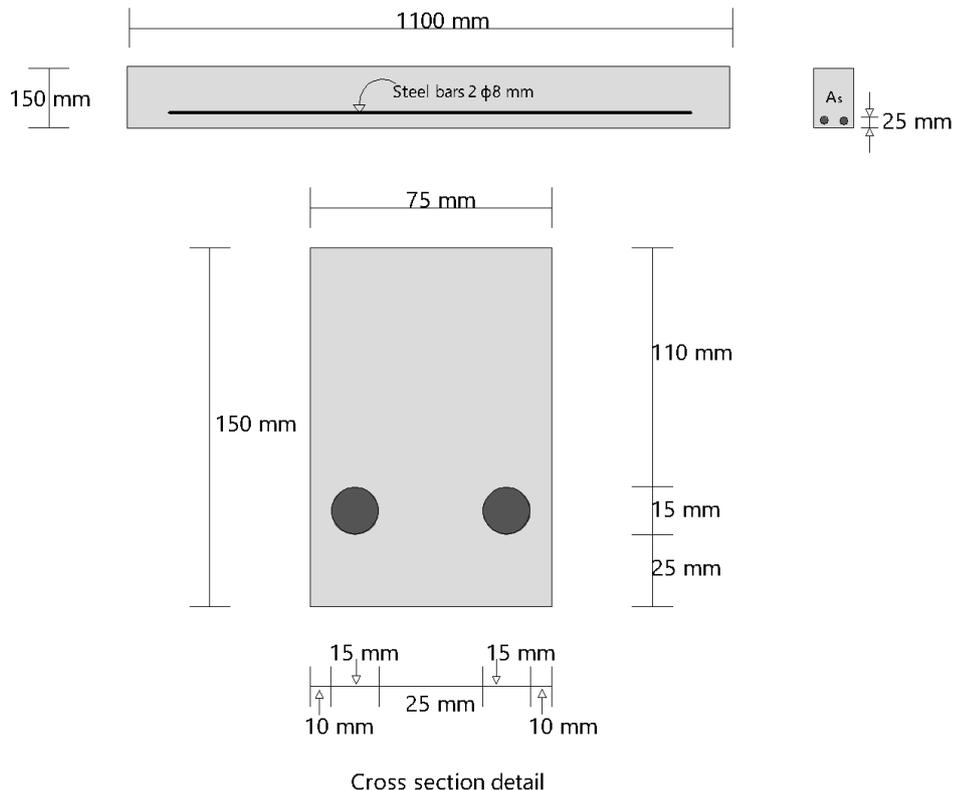
Penelitian ini menggunakan *fly ash* tipe C yang didapatkan dari PLTU Paiton. Material lainnya yang dibutuhkan seperti pasir dan koral. Pasir yang digunakan berasal dari Lumajang sebagai agregat halus, sedangkan koral sebagai agregat kasar dengan ukuram 10 mm. Semen yang digunakan adalah semen Gresik. *Strain gauge* yang digunakan memiliki tipe 120 ohm 6AA (BX120-6AA). Kabel (jenis *redblack*) yang dibutuhkan adalah 3 m setiap satu balok. Besi polos yang digunakan memiliki ϕ 8 mm. Komposisi campuran untuk benda uji balok beton bertulang tunggal yaitu normal atau 0% *fly ash* (1:2:3), campuran 5% *fly ash* (0,95:0,05:2:3), campuran 10% *fly ash* (0,90:0,10:2:3), campuran 15% *fly ash* (0,85:0,15:2:3) dan campuran 20% *fly ash* (0,80:0,20:2:3) dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Proporsi campuran beton

Kode Campuran	Proporsi Campuran	PPC (Kg/m ³)	Substitusi Semen Fly Ash (Batu Bara) (Kg/m ³)	Agregat Halus (Kg/m ³)	Agregat Kasar (Kg/m ³)
Beton Normal	1:2:3	7,5	0	14,5	22
BF - 5%	0,95:0,05:2:3	7,1	0,4	14,5	22
BF - 10%	0,90:0,10:2:3	6,8	0,8	14,5	22
BF - 15%	0,85:0,15:2:3	6,4	1,1	14,5	22
BF - 20%	0,80:0,20:2:3	6,0	1,5	14,5	22

Pembuatan dan Pemeliharaan Benda Uji

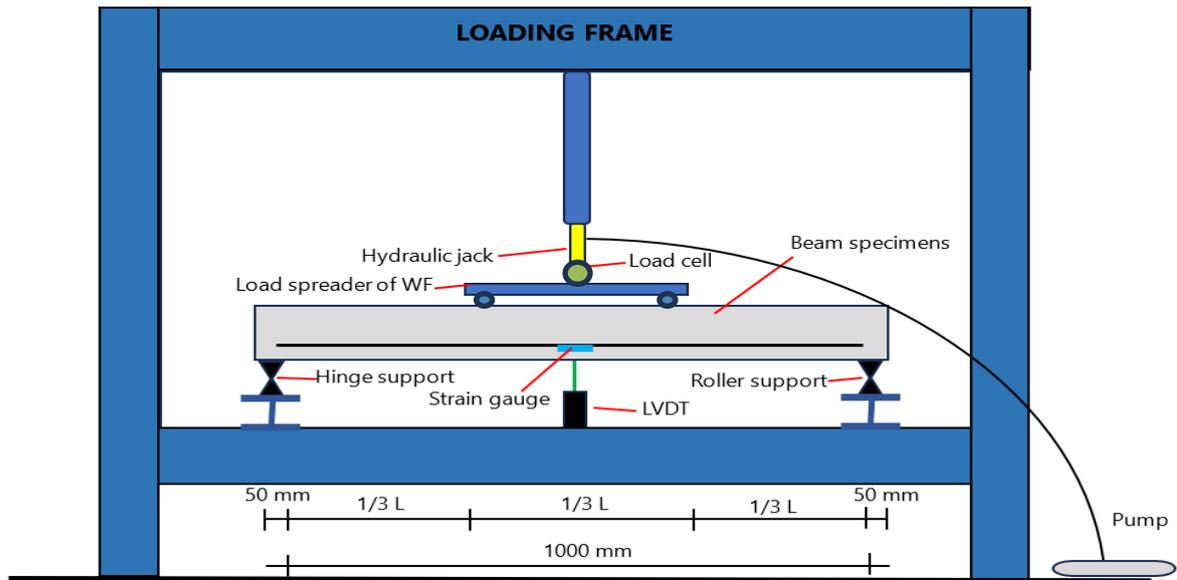
Setelah persiapan bahan material selesai, maka pembuatan benda uji balok dan silinder dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Jember. Jumlah benda uji balok sebanyak 5 buah dengan ukuran 75 mm x 150 mm x 1100 mm seperti pada Gambar 1 untuk detail penulangan, dan benda uji silinder sebanyak 5 buah dengan cetakan silinder ukuran 150 mm x 300 mm. Setelah pembuatan benda uji selesai maka dilanjutkan pemeliharaan benda uji. Benda uji balok dilakukan penyiraman selama 28 hari dengan perawatan menggunakan karung goni (bagian atas benda uji ditutupi) sedangkan benda uji silinder dilakukan *curing* (perendaman) selama 28 hari.



Gambar 1. Detail penulangan balok beton bertulang tunggal

Pengaturan Pengujian Dasar

Tahap pertama pengujian karakteristik material dan pengujian benda uji (kuat tekan silinder dan kuat lentur balok) serta analisa data (kapasitas lentur, kekakuan, daktilitas, pola retak dan jenis keruntuhan). Pengujian karakteristik material dilakukan untuk mendapatkan nilai kadar air, penyerapan air, kadar lumpur, berat jenis, berat volume, analisa ayakan dan keausan agregat. Pengujian benda uji silinder dilakukan menggunakan alat *compression testing machine*. Pengujian benda uji balok dilakukan dengan teknik empat titik berdasarkan aturan ASTM C 78. Terdapat dua titik beban dengan jarak $\frac{1}{3}L$ dari balok tumpuan, dengan menggunakan penyebar beban WF. *Strain gauge* dipasang pada tulangan baja $\frac{1}{2}L$ dari balok penyangga. Pengukur regangan dihubungkan ke pengukur regangan digital. Lendutan yang terjadi pada balok dideteksi menggunakan LVDT (*linear variabel perpindahan transducer*) $\frac{1}{2}L$ dari penyangga balok. Dongkrak hidrolik digunakan untuk pembebanan balok dan sel beban 200 kN dihubungkan ke indikator beban. Pembacaan indikator beban digunakan sebagai pengontrol dongkrak hidrolik, pembacaan defleksi, dan pembacaan regangan, sesuai dengan metode pengendalian beban. Setelah balok uji mencapai beban ultimitnya, pembacaan dilakukan sesuai dengan metode kontrol defleksi. Pola keruntuhan diamati dan diidentifikasi melalui retakan yang terjadi, dimulai dari retakan pertama hingga keruntuhan balok. Pengaturan peralatan uji dan skema beban ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Set up uji balok

Rumus kuat lentur menurut peraturan IS 516:1959 yang digunakan sebagai berikut :

$$f_b = \frac{P \times L}{b \times d^2} \dots \dots \dots (1)$$

$$f_b = \frac{3P \times a}{b \times d^2} \dots \dots \dots (2)$$

Untuk persamaan (1) nilai $a > 20$ cm (ukuran benda uji 15 cm) atau $> 13,3$ cm (ukuran benda uji 10 cm). Untuk persamaan (2) nilai $a < 20$ cm tetapi > 17 cm (ukuran benda uji 15 cm) atau $< 13,3$ cm tetapi > 11 cm (ukuran benda uji 10 cm). Jika nilai $q < 17$ cm (ukuran benda uji 15 cm) atau < 11 cm (ukuran benda uji 10 cm), hasil pengujian tidak digunakan. Keterangan: (P) beban maks pada mesin uji (Kg); (F_b) kuat lentur benda uji (modulus keruntuhan); (b) lebar benda uji (cm); (d) kedalaman benda uji pada titik jatuh (cm); (L) panjang bentang tempat benda uji ditopang (cm); dan (a) jarak antara garis patah dan tumpuan terdekat, diukur pada garis tengah sisi tarik benda uji (cm). Rumus kuat lentur menurut peraturan ASTM C 78 yang digunakan sebagai berikut :

$$\sigma_1 = \frac{P \times L}{b \times h^2} \dots \dots \dots (3)$$

$$\sigma_1 = \frac{P \times a}{b \times h^2} \dots \dots \dots (4)$$

Untuk persamaan (3) letak bidang patah tengah di area 1/3 jarak titik. Untuk persamaan (4) letak bidang patah diluar tengah (pusat) dengan jarak $< 5\%$ dari titik perletakan (antar titik pusat dengan titik patah). Jika letak patah berada 1/3 diluar area pusat dengan jarak bentang $> 5\%$, maka hasil pengujian tidak digunakan. Keterangan: (P) beban maks pada mesin uji (kN); (b) lebar arah horizontal (tampang lintang patah) (mm); (L) bentang jarak (dua garis perletakan); (σ_1) kuat lentur (Mpa); (a) jarak antara tumpang patah dengan tumpuan luar terdekat dan; (h) lebar arah vertikal (tampang lintang patah) (mm). Rumus kuat tekan, daktilitas dan kekakuan sebagai berikut:

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (5)$$

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \dots \dots \dots (6)$$

$$K = \frac{P}{\Delta} \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan: (μ) faktor daktilitas (*displacement ductility factor*); (Δy) lendutan pada lelehan awal (mm); (Δu) lendutan maksimal struktur (mm); (f'_c) kuat tekan beton (MPa atau N/mm²); (A) luas penampang melintang (mm²); (P) gaya tekan aksial (N); (K) kekakuan (Kn/mm); (Δ) perpindahan (mm) dan; (P) gaya (kN).

Uji Statistika (Analisa Regresi)

Umumnya analisis regresi digunakan untuk mengetahui hubungan sebab-akibat pada variabel independen dengan variabel dependen (Mukhlis *et al.*, 2022). Metode yang digunakan adalah fungsi kuadrat sebagai regresi (Rau *et al.*, 2018). Untuk menganalisis hubungan sebab-akibat digunakan bentuk persamaan sebagai berikut:

$$Y_i = f(X_i, \beta) + e_i \dots \dots \dots (8)$$

$$R^2 = \frac{JKr}{JKt} \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan: (Y_i) variabel dependen; (X_i) variabel independen; (e_i) variabel error; (f) fungsi; (β) variabel yang tidak diketahui; (R^2) koefisien determinasi; (JKt) jumlah kuadrat total; dan (JKr) jumlah kuadrat regresi.

HASIL PEMBAHASAN

Pengujian Karakteristik Agregat dan Fly Ash Batu Bara

Pada penelitian ini pasir (agregat halus) yang digunakan adalah pasir Lumajang dan koral (agregat kasar) adalah koral dengan ukuran 10 mm serta fly ash batu bara dari PLTU. Paiton dengan tipe C. Dalam pengujian didapatkan nilai kadar air, penyerapan air, kadar lumpur, berat jenis, berat volume, analisa ayakan dan keausan agregat yang telah diuji di Laboratorium Beton Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Jember. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian karakteristik agregat dan fly ash batu bara

Jenis Pengujian	Agregat Kasar		Agregat Halus		Fly Ash	
	Standar Acuan dan Spesifikasi	Hasil dan Keterangan	Standar Acuan dan Spesifikasi	Hasil dan Keterangan	Standar Acuan dan Spesifikasi	Hasil dan Keterangan
Kadar Air (%)	ASTM C 33 (0,5% - 2%)	0,807 Memenuhi	ASTM C 33 (3% - 5%)	1,215 Tidak Memenuhi	ASTM C618-08a	0,143 Memenuhi (maksimal 3%)
Penyerapan air (%)	ASTM C 33 (0,2% - 4%)	0,807 Memenuhi	ASTM C 33 (0,2% - 2%)	1,215 Memenuhi	-	-
Kadar lumpur (%)	ASTM C 33 (-)	0,100 Memenuhi	ASTM C 33 (0,2% - 6%)	0,402 Memenuhi	-	-
Berat jenis (gram/cm ³)	ASTM C 33 (1,60 - 3,20 gram/cm ³)	2,584 Memenuhi	ASTM C 33 (1,60 - 3,20 gram/cm ³)	2,721 Memenuhi	ASTM C618-08a (3,15 gram/cm ³)	2,632 Memenuhi
Berat volume (gram/cm ³)	ASTM C 33 (1,60 - 1,90 gram/cm ³)	1,197 Memenuhi	ASTM C 33 (-)	1,352 Memenuhi	-	-
Analisa ayakan (%)	ASTM C 33 (5,5% - 8,5%)	7,278 Memenuhi	ASTM C 33 (2,20% - 3,10%)	3,909 Memenuhi	-	-
Keausan agregat (%)	ASTM C 535-03 (< 50%)	32,14 Memenuhi	-	-	-	-

Dari hasil uji karakteristik pada Tabel 2 agregat kasar didapatkan kadar air sebesar 0,807%, penyerapan air 0,807%, kadar lumpur 0,100%, berat jenis 2,584 gram/cm³, berat volume 1,197 gram/cm³, analisa ayakan 7,278%, dan keausan agregat 32,14%. Menurut Kamil & Nely (2023), pengujian kadar air pada agregat kasar diperlukan dalam menentukan konsistensi campuran pada beton. Pengujian kadar lumpur dilakukan untuk mengetahui bahwa agregat mempunyai tingkat kebersihan yang baik (kandungan lumpur dalam koral) dengan ditunjukkan rendahnya kadar lumpur maka adanya pengendapan atau segregasi dapat

terhindar (Mose *et al.*, 2022). Dilakukannya uji berat jenis untuk mengukur seberapa pengaruh agregat kasar terhadap berat total campuran beton (Kamil & Nely, 2023). Menurut Mose *et al.* (2022), pengujian analisa ayakan diperlukan untuk mengetahui besar butiran pada agregat kasar atau halus. Pengujian keausan agregat untuk penilaian kualitas ketidakseragaman pada ukuran partikel (agregat) (Andika *et al.*, 2021). Dari hasil penelitian (Tabel 2) dapat disimpulkan bahwa agregat kasar untuk campuran beton telah memenuhi ketentuan ASTM C 33 dan ketentuan ASTM C 535-03.

Tabel 2 menunjukkan nilai kadar air 1,215%, penyerapan air 1,215%, kadar lumpur 0,402%, berat jenis 2,721 gram/cm³, berat volume 1,352 gram/cm³, dan analisa ayakan 3,909%. Menurut Mose *et al.* (2022), kadar air dalam agregat halus perlu diketahui atau diuji yang mana akan mempengaruhi kadar air yang dibutuhkan untuk pencampuran beton. Nilai penyerapan air yang tinggi akan cenderung mengikat air lebih banyak pada campuran beton dan hal ini akan memengaruhi kinerja beton, sedangkan nilai kadar lumpur digunakan untuk menunjukkan kadar lumpur pada agregat halus karena hal ini akan mempengaruhi permeabilitas, kohesi dan retakan pada beton (Kamil & Nely, 2023). Dari hasil penelitian (Tabel 2) dapat disimpulkan bahwa agregat halus untuk campuran beton telah memenuhi ketentuan ASTM C 33 selain nilai kadar airnya. Kemudian *fly ash* batu bara untuk campuran beton telah memenuhi ketentuan ASTM C618-08a dengan nilai kadar air sebesar 0,143% dan berat jenis 2,632 gram/cm³.

Pengujian Slump

Sebelum penuangan beton segar ke dalam cetakan silinder dan balok dilakukan pengujian *slump* terlebih dahulu untuk mengetahui seberapa kental adukan beton yang akan dicetak. Hasil uji *slump* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil uji *slump*

Variasi Campuran	Persentase Fly Ash (%)	Nilai Slump (mm)
Beton Normal	0	105
BF-5%	5	116
BF-10%	10	105
BF-15%	15	120
BF-20%	20	118

Tabel 3 menunjukkan nilai *slump* pada semua variasi beton *fly ash* (BF) mengalami kenaikan kecuali variasi BF-10% tidak berbeda dibandingkan beton normal. Besar peningkatan masing-masing yaitu variasi 5% meningkat sebesar 10,48% dari beton normal, variasi 10% mengalami penurunan sebesar 9,48% dari variasi 5%, variasi 15% meningkat sebesar 14,29% dari variasi 10%, dan variasi 20% mengalami penurunan sebesar 1,67% dari variasi 15%. Dapat disimpulkan bahwa nilai *slump* optimum yaitu 120 mm pada penambahan *fly ash* batu bara 15% dan didapatkan nilai yang beragam yaitu 105 – 120 mm dan sesuai yang direncanakan yaitu untuk elemen struktur balok nilai *slump* adalah 75 – 150 mm. Menurut Hardagung *et al.* (2014), semakin tinggi nilai *slump* maka adukan beton semakin mudah untuk diolah. Faktor air menjadi peranan penting yang dapat mempengaruhi nilai *slump* (Rahmawaty *et al.*, 2023).

Pengujian Kuat Tekan Beton

Benda uji yang digunakan untuk uji kuat tekan beton adalah bentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Hasil pengujian yang dilakukan terhadap 5 buah silinder diperoleh kuat tekan rata-rata pada umur 28 hari berdasarkan substitusi *fly ash* batu bara terhadap berat semen dengan presentase 5%, 10%, 15% dan 20% dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil uji silinder

No	Sampel	Berat Beton (Kg)	Beban _{maks} (kN)	Luas Silinder (mm ²)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	Beton Normal	12,60	263		14,89	
2	BF-5%	12,50	385		21,80	
3	BF-10%	12,50	391	17678,6	22,14	21,53
4	BF-15%	12,60	457		25,87	
5	BF-20%	12,90	405		22,93	

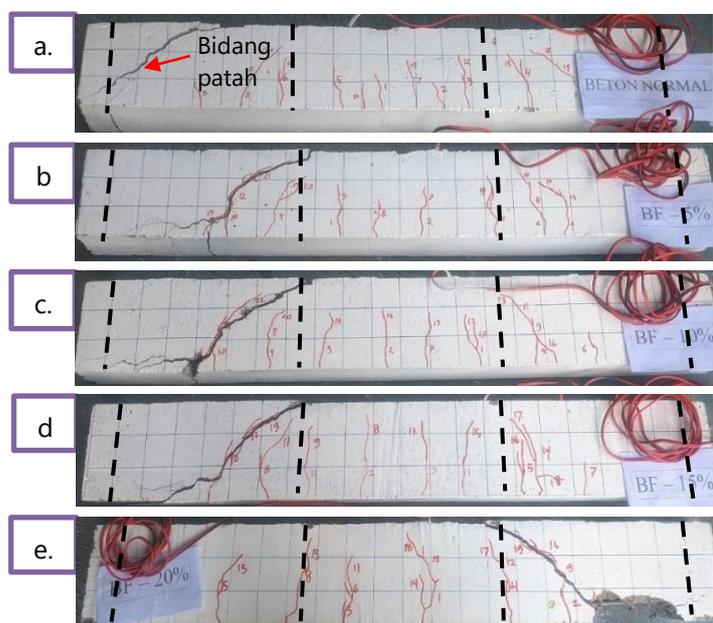
Dari hasil pengujian silinder pada Tabel 4 di dapatkan kuat tekan beton dengan penambahan *fly ash* batu bara mengalami peningkatan dari beton normal. Besar peningkatan masing-masing yaitu variasi 5% meningkat sebesar 46,41% dari beton normal, variasi 10% meningkat sebesar 1,54% dari variasi 5%, variasi 15% meningkat sebesar 14,42% dari variasi 10%, dan variasi 20% mengalami penurunan sebesar 12,82% dari variasi 15%. Didapatkan nilai kuat tekan optimum yaitu 25,87 MPa pada penambahan *fly ash* batu bara 15%. Hal ini sejalan dengan penelitian terdahulu yaitu menurut Suhaimi & Muajibullah (2022), bahwa adanya penambahan *fly ash* batu bara dalam campuran beton, penambahan bahan tertentu dapat meningkatkan ketahanan tekanan beton karena *fly ash* batu bara memiliki kandungan silika seperti semen dimana terjadi peningkatan kerapatan pada beton sehingga nilai kuat tekan pada beton meningkat. Pada variasi penambahan *fly ash* batu bara 20% kuat tekan mengalami penurunan yang dimungkinkan terjadi akibat penurunan nilai *slump test* beton segar sehingga mengurangi peningkatan kepadatan pada beton (Ngudiyono *et al.*, 2022)

Pengujian Kuat Lentur Balok

Acuan yang digunakan untuk mengetahui nilai kuat lentur balok pada penelitian ini yaitu menggunakan ASTM C 78 dapat dilihat pada Tabel 5 dan *Indian Standart* (IS 516:1959) pada Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 5. Analisa kuat lentur balok berdasarkan hasil uji (ASTM C 78)

Variasi	Bentang Balok (L) (mm)	Lebar Balok (b) (mm)	Tebal Balok (h) (mm)	Beban Lentur (P_{maks}) (N/mm ²)	Kuat Lentur (MPa)
Beton Normal	1000	150	75	18067	
BF-5%	1000	150	75	18215	
BF-10%	1000	150	75	19865	Tidak dihitung
BF-15%	1000	150	75	21493	
BF-20%	1000	150	75	20131	



Gambar 3. Bidang patah pada balok hasil pengujian. (a) Beton Normal; (b) BF-5%; (c) BF-10%; (d) BF-15%; dan (e) BF-20%

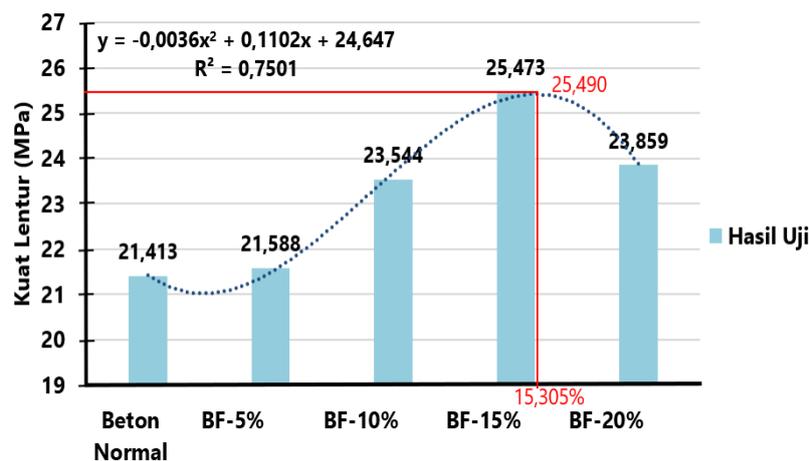
Dari hasil kuat lentur berdasarkan hasil pengujian menggunakan acuan ASTM C 78 pada Tabel 5 tidak bisa dihitung, dimana hasil pengujian menghadapi wilayah perbatasan yang terletak di luar inti pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah) dan garis patah > 5% dari bentang dapat dilihat pada Gambar 3. Hal tersebut menandakan bahwa balok mengalami kegagalan geser karena adanya aksi

gabungan dari lentur dan geser. Saat dilakukan uji kekuatan pada balok, terjadi kegagalan mendadak di titik penopangnya. Hal ini sejalan dengan penelitian terdahulu yaitu menurut Buarlele *et al.* (2020), bahwa kejadian kegagalan pergeseran terjadi saat beton telah mencapai peregangan maksimal sedangkan tulangnya belum mencapai ambang batas peregangan. Pada balok beton bertulang, kegagalan pergeseran terjadi secara mendadak. Adanya tulangan geser dipengaruhi oleh kuat tekan beton, rasio tulangan longitudinal, tinggi efektif penampang dan rasio bentang geser-tinggi efektif.

Tabel 6. Analisa kuat lentur balok berdasarkan hasil uji (IS 516:1959)

Variasi	Bentang Balok (L) (mm)	Lebar Balok (b) (mm)	Tebal Balok (d) (mm)	Beban Lentur (P_{maks}) (N/mm ²)	Kuat Lentur (MPa)
Beton Normal	1000	150	75	18067	21,413
BF-5%	1000	150	75	18215	21,588
BF-10%	1000	150	75	19865	23,544
BF-15%	1000	150	75	21493	25,473
BF-20%	1000	150	75	20131	23,859

Dari hasil kuat lentur berdasarkan hasil pengujian menggunakan acuan IS 516:1959 pada Tabel 6 didapatkan nilai kuat lentur dengan penambahan *fly ash* batu bara mengalami peningkatan dari beton normal, besar peningkatan masing-masing yaitu variasi 5% meningkat sebesar 0,82% dari beton normal, variasi 10% meningkat sebesar 9,06% dari variasi 5%, variasi 15% meningkat sebesar 8,19% dari variasi 10%, dan variasi 20% mengalami penurunan sebesar 6,34% dari variasi 15%. Grafik hasil kapasitas kuat lentur berdasarkan hasil pengujian (IS 516:1959) dapat dilihat pada Gambar 4.



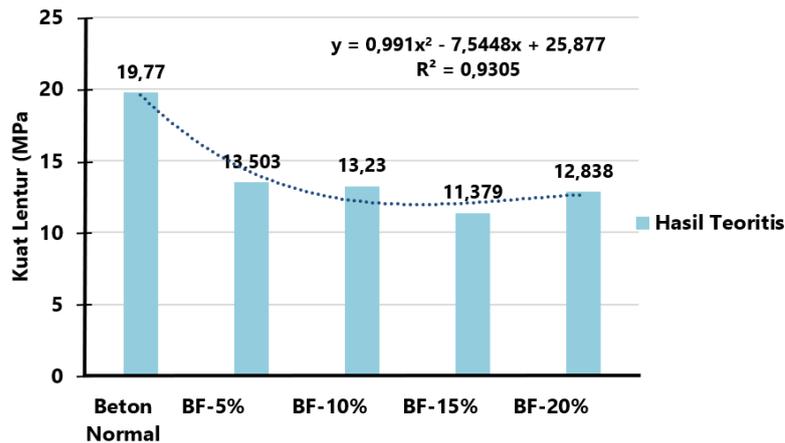
Gambar 4. Kapasitas kuat lentur balok hasil uji

Dari hasil analisis regresi pada Gambar 4 didapatkan hubungan kadar penambahan *fly ash* batu bara dengan persamaan $Y = -0,0036x^2 + 0,1102x + 24,647$ dan nilai $R^2 = 0,7501$, hal ini menunjukkan bahwa 75% perubahan kuat lentur dipengaruhi kadar penambahan *fly ash* batu bara sedangkan sisanya dipengaruhi variabel lain. Didapatkan nilai kuat lentur optimum yaitu 25,473 MPa pada penambahan *fly ash* batu bara sebesar 15%. Untuk nilai optimum kuat lentur berdasarkan garis regresi adalah 25,490 MPa sementara variasi campuran beton *fly ash* batu bara didapatkan kadar optimum sebesar 15,305%. Dalam mendapatkan nilai optimum tersebut dilakukan diskriminan (fungsi kuadrat) terhadap persamaan regresi yang didapatkan (Wibowo *et al.*, 2023; Rau *et al.*, 2018). Hal ini sejalan dengan penelitian terdahulu yaitu menurut Ismail *et al.* (2017), bahwa adanya penambahan *fly ash* batu bara pada adukan beton dapat meningkatkan kuat lentur beton karena *fly ash* batu bara berfungsi sebagai *filler* yang mengisi rongga-rongga dalam beton. *Fly ash* batu bara memiliki kandungan kalsium oksida (CaO) silikon dioksida (SiO₂) yang mana saat dicampurkan pada beton dapat meningkatkan penyebaran partikel semen dan menyebabkan semen menjadi reaktif. Pada variasi penambahan *fly ash* batu bara 20% kuat lentur mengalami penurunan yang dimungkinkan akibat turunnya kuat tekan beton dan seiring bertambahnya kadar penggunaan *fly ash* batu bara sebagai pengganti sebagian semen mengakibatkan kadar air yang

telah direncanakan tidak cukup untuk menghidrasi semen dengan sempurna (Tata & Sabaruddin, 2022). Menurut (Pratama *et al.*, 2020), semakin besar nilai kuat tekan beton maka akan semakin meningkatkan nilai kapasitas lentur.

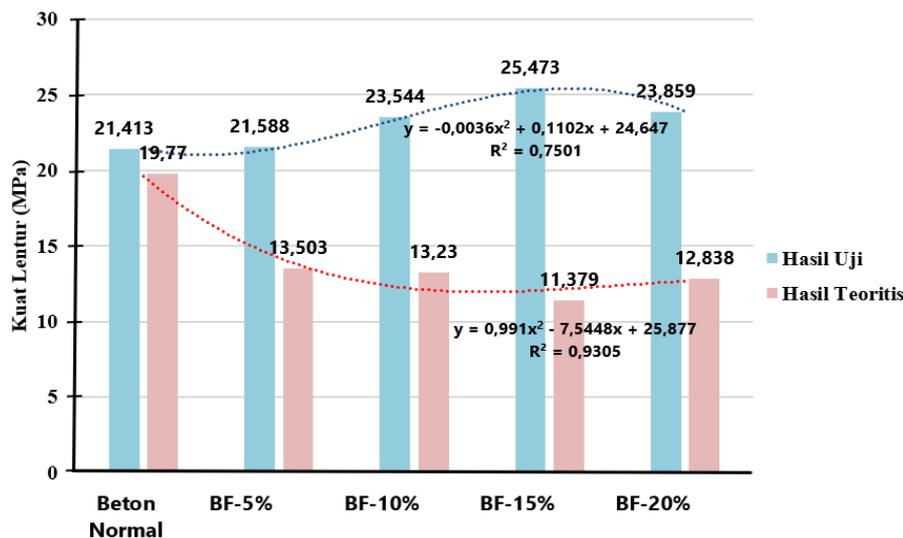
Tabel 7. Analisa kuat lentur balok berdasarkan hasil teoritis

Variasi	Beban Lentur (P_{maks}) (N/mm ²)	Kuat Lentur (MPa)
Beton Normal	18067	19,770
BF-5%	18215	13,503
BF-10%	19865	13,230
BF-15%	21493	11,379
BF-20%	20131	12,838



Gambar 5. Kapasitas kuat lentur balok hasil teoritis

Dari hasil analisis regresi pada Gambar 5 merupakan perhitungan dari hasil teoritis tanpa ada faktor *fly ash* batu bara. Maka persamaan yang didapatkan adalah $Y = 0,991x^2 - 7,5448x + 25,877$ dan nilai $R^2 = 0,9305$, hal ini menunjukkan bahwa 93% kuat lentur hanya berdasarkan perhitungan teoritis sedangkan sisanya dipengaruhi variabel lain. Dilakukannya perhitungan teoritis sebagai pembandingan dengan hasil uji.



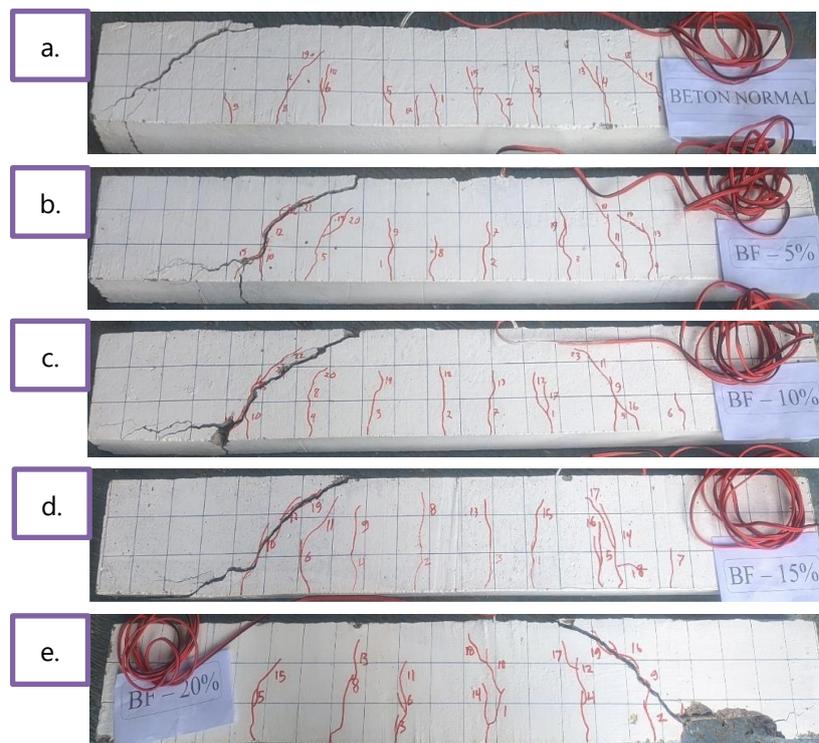
Gambar 6. Perbedaan nilai kuat lentur berdasarkan hasil uji dan teoritis

Berdasarkan Gambar 6 dapat diketahui bahwa hasil kuat lentur dari hasil uji dan teoritis memiliki perbedaan yaitu untuk beton normal hasil uji lebih besar dari hasil teoritis dengan persentase 8,31%, Variasi BF-5% hasil uji lebih besar dari hasil teoritis dengan persentase 59,88%, Variasi BF-10% hasil uji lebih besar dari hasil teoritis dengan persentase 77,96%, Variasi BF-15% hasil uji lebih besar dari hasil teoritis dengan persentase 123,88%, dan Variasi BF-20% hasil uji lebih besar dari hasil teoritis dengan persentase 85,85%.

Pola Retak dan Keruntuhan

Pola retak pada balok disebabkan oleh tekanan awal hingga tegangan mencapai maksimum. Semakin besar tekanan yang diberikan, retakan akan melebar atau menyebar. Pola retak untuk masing-masing penampang balok gambar 11 menunjukkan bahwa pada ilustrasi ke-11(a), terjadi 2 retakan awal di bagian tengah bentang membentuk garis halus vertikal (retak lentur) pada beban 6,14 kN. Retak lentur kemudian muncul secara menerus yaitu pada beban 8,06 kN sebanyak 4 retak baru dan mencapai garis netral, beban 10,04 kN 1 retakan baru, beban 12,42 kN 3 retak baru dan 1 retak lanjutan dan beban 13,97 kN 4 retak lanjutan. Untuk beban 16,12 kN mulai terjadi retak geser dengan munculnya garis miring sebanyak 1 retakan dan 1 retak lanjutan dari retak lentur, dan pada saat beban puncak yaitu 18,07 kN muncul retak utama berupa retak diagonal yang menunjukkan bahwa balok mengalami kegagalan geser (*shear failure*) atau mengalami keruntuhan tarik di arah retak miring.

Pada Gambar 11(b), terjadi 2 retakan awal di bagian tengah bentang membentuk garis halus vertikal (retak lentur) pada beban 4,04 kN. Retak lentur kemudian muncul secara menerus yaitu pada beban 6,15 kN sebanyak 3 retak baru, beban 8,20 kN 3 retakan baru dan 2 retak lanjutan dari retak sebelumnya dan mencapai garis netral, beban 10,23 kN 2 retak lanjutan, beban 12,25 kN 2 retak lanjutan, beban 14,08 kN mulai terjadi retak geser dengan munculnya garis miring sebanyak 2 retak lanjutan dari retak lentur, beban 16,34 kN 3 retak lentur lanjutan dan 2 retak geser lanjutan. Pada saat beban puncak yaitu 18,22 kN muncul retak utama berupa retak diagonal yang menunjukkan bahwa balok mengalami kegagalan geser (*shear failure*) atau mengalami keruntuhan tarik di arah retak miring.



Gambar 7. Pola retak balok *fly ash* batu bara. (a) Beton Normal; (b) BF-5%; (c) BF-10%; (d) BF-15%; dan (e) BF-20%

Pada Gambar 7(c), terjadi 5 retakan awal di bagian tengah bentang membentuk garis halus vertikal (retak lentur) pada beban 6,12 kN. Retak lentur kemudian muncul secara menerus yaitu pada beban 8,13 kN sebanyak 2 retak baru dan 2 retak lanjutan dari retak sebelumnya dan mencapai garis netral, beban 10,31 kN 1 retakan baru, beban 10,23 kN 2 retak lanjutan, beban 12,24 kN 5 retak lanjutan, beban 14,12 kN 4 retak lanjutan, beban 16,23 kN mulai terjadi retak geser dengan munculnya garis miring sebanyak 1 retak lanjutan dari retak lentur dan 1 retak lanjutan, beban 18,54 kN 2 retak geser lanjutan. Pada saat beban puncak yaitu 19,87 kN muncul retak utama berupa retak diagonal yang menunjukkan bahwa balok mengalami kegagalan geser (*shear failure*) atau mengalami keruntuhan tarik di arah retak miring.

Pada Gambar 11(d), terjadi 4 retakan awal di bagian tengah bentang membentuk garis halus vertikal (retak lentur) pada beban 6,31 kN. Retak lentur kemudian muncul secara menerus yaitu pada beban 8,44 kN sebanyak 3 retak baru, beban 10,01 kN 2 retak lanjutan dari retak sebelumnya dan mencapai garis netral, beban 12,22 kN 1 retakan baru, beban 14,38 kN 3 retak lanjutan dan 1 retak baru, beban 16,01 kN 2 retak lanjutan, beban 18,20 kN mulai terjadi retak geser dengan munculnya garis miring sebanyak 1 retak lanjutan dari retak lentur, beban 20,51 kN 1 retak geser lanjutan dan 1 retak lanjutan dari lentur. Pada saat beban puncak yaitu 21,49 kN muncul retak utama berupa retak diagonal yang menunjukkan bahwa balok mengalami kegagalan geser (*shear failure*) atau mengalami keruntuhan tarik di arah retak miring.

Pada Gambar 11(e), terjadi 3 retakan awal di bagian tengah bentang membentuk garis halus vertikal (retak lentur) pada beban 4,15 kN. Retak lentur kemudian muncul secara menerus yaitu pada beban 6,26 kN sebanyak 2 retak baru dan 1 retak lanjutan, beban 8,22 kN 2 retak baru dan mencapai garis netral, beban 10,23 kN 3 retak lanjutan dari retak sebelumnya, beban 12,33 kN 2 retak lanjutan, beban 14,45 kN 2 retak lanjutan, beban 16,18 kN 2 retak lanjutan, beban 18,7 kN mulai terjadi retak geser dengan munculnya garis miring sebanyak 2 retak lanjutan dari retak lentur. Pada saat beban puncak yaitu 20,13 kN muncul retak utama berupa retak diagonal yang menunjukkan bahwa balok mengalami kegagalan geser (*shear failure*) atau mengalami keruntuhan tarik di arah retak miring.

Dari pola retak dan keruntuhan pada balok beton bertulang tunggal yang telah dipaparkan, semua balok mengalami pola retak lentur geser (*flexural shear crack*) dan keruntuhan tarik (*under reinforced*). Hal ini sejalan dengan penelitian terdahulu yaitu menurut Asyari (2023), bahwa adanya penambahan *fly ash* batu bara pada balok mampu meminimalisir penyebaran retak geser yang mana diakibatkan oleh pembebanan sebelumnya serta mencegah munculnya retak geser yang baru. Sehingga arah retakan vertikal dari daerah tarik menuju daerah tekan didominasi oleh pola retak lentur.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian pengaruh penambahan *fly ash* batu bara terhadap kinerja balok beton bertulang tunggal sebagai berikut:

1. Penambahan *fly ash* batu bara dapat meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang tunggal sebesar 18,96% (nilai tertinggi pada variasi 15% yaitu 25,473 MPa) dibandingkan balok beton bertulang tunggal normal.
2. Penambahan *fly ash* batu bara dapat meningkatkan daktilitas balok beton bertulang tunggal sebesar 2,74% dan mengalami penurunan nilai kekakuan sebesar 24,44% dibandingkan balok beton bertulang tunggal normal.
3. Balok dengan *fly ash* batu bara mempunyai pola retak dan keruntuhan sama dengan balok beton normal, yaitu dimulai dari pola retak lentur dan geser (*flexural shear crack*) dan diakhiri dengan keruntuhan geser atau keruntuhan tarik (*under reinforced*).

DAFTAR PUSTAKA

- Afrilia, A. T. (2023). Studi eksperimental kekakuan balok beton bertulang rangkap dengan agregat normal. *Jurnal Smart Teknologi*, 4(4), 100–106.
- Andika, Y., Saputro, T. I. & Bonde, O. (2021). Studi eksperimental kuat tekan beton menggunakan material dari kali jodoh. *Jurnal Karkasa*, 7(1), 22–27.
- ASTM, C33. (2013). *Standard specification for concrete aggregates*. United States.
- ASTM, C78-02. (2002). *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. United States.
- ASTM, C618-08a. (2008). *Standard specification of coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. United States.
- ASTM, C535-03. (2003). *Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine*. United States.

- Asyari, M. (2023). Perilaku lentur dan geser balok beton normal bertulang dengan abu terbang (fly ash). In *Skripsi*. Universitas Mataram.
- Buarlele, L., Benny, K., & Jonie, T. (2020). Prediksi kekuatan geser beton pada balok beton bertulang tanpa tulangan geser. *Jurnal Teknik Sipil*, 16(1), 1–13.
- Chinh, V. N. (2021). Flexural performance of reinforced concrete beams made with locally sourced fly ash. *J. Sci and Tech.Civil Engineer*, 15(2), 38–50.
- Diana, I. A. & Subaidillah, F. (2020). Pengaruh penambahan limbah botol plastik dan variasi fly ash terhadap penyerapan paving blok ramah lingkungan. *J. REKAYASA*, 13(1), 55–60.
- Hardagung, T. H., Sambowo, A. K. & Gunawan, P. (2014). Kajian nilai slump, kuat tekan dan modulus elastisitas beton dengan bahan tambahan filler abu batu paras. *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 2(2), 131–137.
- IS-516-1959, Indian Standart. (1959). *Method of tests for strength of concrete*. Bureau of Indian Standart.
- Ismail, A. G., Andhi, M., Arum, D., Muhammad, M. R., & Kusno, A. S. (2017). Pengaruh beton daur ulang dan bahan tambah fly ash terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton struktural ramah lingkungan. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 1(1), 59–63.
- Kamil, F. & Kurnila, N. (2023). Pengujian awal agregat kasar, agregat halus, semen, dan air: fondasi penelitian beton berkualitas. *Jurnal Konstruksi Dan Infrastruktur*, XI(2), 78–88.
- Kar, K. K. (2022). *Handbook of fly ash*. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier.
- Khasanah, L., & Arief, B. (2022). Pengaruh penambahan FABA terhadap sifat fisik dan derajat keasaman (pH) kompos. *Jurnal Teknologi Separasi*, 8(3), 460–468.
- Klarens, K., Michael, I., Antoni & Diwantoro, H. (2016). Pemanfaatan bottom ash dan fly ash tipe c sebagai bahan pengganti dalam pembuatan paving block. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 5(2), 1–8.
- Marulitua, A., Deny, S., & Zeldi, M. (2022). Perancangan struktur beton bertulang pada bangunan gedung rumah dan toko 4 lantai di Jalan Sepakat II Kota Pontianak. *Rekayasa Teknik Sipil*, 2(2), 1–9.
- Muharram, M. F., & Eko, W. (2021). Pengaruh penggunaan fly ash sebagai substitusi semen dan limbah kaca sebagai substitusi agregat halus terhadap kuat tekan beton. *Jurnal Konstruksi*, 19(2), 410–417.
- Mukhlis, A., Agustiar, Giovanni, & Nazaruddin. (2022). Pengaruh variasi faktor air semen terhadap kuat tekan beton dengan menggunakan abu cangkang. *Jurnal Ilmiah Unida*, 3(2), 159–171.
- Mose, L., Johannes, J. & Sahureka, M. J. T. (2022). Perbandingan kuat tekan beton dengan menggunakan agregat sungai desa tepa dan pantai wati desa yatoke di pulau babar. *Jurnal Manumata*, 8(1), 1–10.
- Ngudiyono, Ni Nyoman, N. K., & Rizky, P. (2022). Pemanfaatan fly ash sebagai bahan substitusi semen pada beton memadat sendiri. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(1), 55–61.
- Ningtyas, M. G. C. (2024). Perilaku lentur dan geser balok beton normal bertulang sandwich dengan inti beton ringan berbahan fly ash. In *Skripsi*, Universitas Mataram.
- Pratama, P. H., Rudiansyah, P., & Teuku, B. A. (2020). Kapasitas lentur beton bertulang mutu ultra tinggi menggunakan fly ash batu bara sebagai aditif dan bijih besi sebagai filler. *Journal of The Civil Engineering Student*, 3(2), 260–266.
- Priyatham, S. V. R. P. B., Chaitanya, K. S. V. D. & Kumar, P. G. (2021). Effect of ferrochrome slag and fly ash on the mechanical properties of concrete. *IOP: Materials Sci. and Engineering*, 1025, 1–8.
- Pujantara, R. (2014). Struktur beton bertulang dalam perspektif fleksibilitas bentuk dan arsitektur plastis pada rancangan dekonstruksi. *J. Forum Bangunan*, 12(2), 68–72.

- Rahmawaty, F., Candra, I. A., Hidiyati, F. E., Cahyono, D. A., Mahardana, B. Z., Karisma, A. D., Ali, K. K. M. & Azhari, M. F. (2023). Optimasi kuat tekan beton menggunakan fly ash dan superplasticizer. *Journal CIVED*, 10(2), 670-680.
- Raj, S. B. & Rao, K. M. (2023). Flexural performance of sustainable fly ash based concrete beams. *IOP: Earth and Environment. Sci*, 1130, 1–10.
- Rau, D. H. F., Indra, S. & Erfan, M. (2018). Analisa pengaruh pemakaian fly ash sebagai sementisius pada beton mutu sedang terhadap kuat tekan beton. *Jurnal Sondir*, 1(x), 18-26.
- Sani, D. S. & Susanti, S. (2020). Pemanfaatan limbah fly ash dari pembakaran batubara pada pembuatan semen PCC (portland composite cement) di PT. Semen XYZ Lampung. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 4(2), 100–105.
- Setiawati, M. (2018). Fly ash sebagai bahan pengganti semen pada beton. In *Prosiding Semnastek*. pag, 1-8, Fakultas Teknik.
- Simanjuntak, O. J. & Saragi, E. T. (2021). Beton bermutu dan ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah abu ban bekas. *J. VIEKS*, 2(2), 141–149.
- Suhaimi., & Muajibullah. (2020). Variasi penambahan fly ash terhadap kuat tekan beton. *J. REKATEK*, 5(1), 10–17.
- Tata, A., & S. (2022). Perilaku lentur balok beton betulang dengan bahan tambah fly ash batu bara. *Jurnal SIPILsains*, 12(1), 49–56.
- Wibowo, Safitri, E. & Arsanto, D. B. (2023). Kajian kuat lentur pada beton bubuk reaktif dengan silica fume 15% dan variasi pasir kuarsa. *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 11(3), 299-306.
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G. (2015). *Reinforced concrete mechanics and design*. Pearson Education: Boston.
- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews Journal*, 141(1), 105–121.