

STUDI EKSPERIMENTAL: PENGARUH ABU TONGKOL JAGUNG TERHADAP SIFAT MEKANIS BETON BIO-KOMPOSIT UNTUK PERKERASAN KAKU

Alzam Darma Putra¹, Sugeng Riyanto²

Mahasiswa Program Studi D-IV Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Malang ¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang ²

Email: alzamputra022@gmail.com¹, sugeng.rivanto@polinema.ac.id²

ABSTRAK

Penggunaan abu tongkol jagung (ATJ) dalam beton bio-komposit merupakan upaya mendukung konsep pembangunan berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah menjadi produk bernilai tambah. Beton bio-komposit diharapkan mampu mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam sekaligus menciptakan material alternatif dengan performa yang sesuai untuk kebutuhan perkerasan jalan kaku. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh penambahan ATJ terhadap karakteristik fisik dan mekanis beton bio-komposit, khususnya kuat tekan, kuat lentur, dan ketahanan terhadap beban lalu lintas. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan lima variasi penambahan ATJ (0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%) terhadap berat semen. Benda uji diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk memperoleh data kuat tekan dan lentur. Komposisi kimia ATJ dianalisis menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF). Perhitungan mix design mengacu pada SNI 03-2834-2000 dan uji lentur menggunakan ASTM C293/C293M. Analisis statistik dilakukan dengan metode ANOVA dua arah. Hasil menunjukkan bahwa penambahan ATJ sebesar 5% memberikan performa terbaik dengan kuat tekan mencapai 23,93 MPa dan kuat lentur 12,68 MPa pada umur 28 hari. Namun, seluruh variasi ATJ menunjukkan kuat tekan di bawah standar minimum perkerasan kaku (25 MPa) menurut SNI 1979:2011. Uji ANOVA menunjukkan pengaruh signifikan dari variasi ATJ dan umur terhadap sifat mekanis beton, dengan interaksi signifikan pada kuat lentur.

Kata kunci : abu tongkol jagung; beton bio-komposit; kuat tekan; kuat lentur; perkerasan kaku.

ABSTRACT

The use of corncob ash (CCA) in bio-composite concrete represents an effort to support sustainable development through the conversion of agricultural waste into value-added materials. Bio-composite concrete is expected to reduce dependence on natural resources while offering performance suitable for rigid pavement applications. This study aims to evaluate the effect of CCA addition on the physical and mechanical properties of bio-composite concrete, particularly compressive strength, flexural strength, and resistance to traffic loads. The research was conducted experimentally with five variations of CCA addition (0%, 5%, 10%, 15%, and 20%) by cement weight. Specimens were tested at 7, 14, and 28 days of curing to measure compressive and flexural strength. Chemical composition was analyzed using X-Ray Fluorescence (XRF), mix design referred to SNI 03-2834-2000, and flexural testing followed ASTM C293/C293M. Statistical analysis used two-way ANOVA. Results showed that 5% CCA addition yielded the best performance with 23.93 MPa compressive strength and 12.68 MPa flexural strength at 28 days. However, all CCA variations resulted in compressive strengths below the minimum threshold of 25 MPa for rigid pavement based on SNI 1979:2011. ANOVA results indicated significant effects of CCA variation and curing age on concrete properties, with interaction effects observed in flexural strength.

Keywords : corncob ash; bio-composite concrete; compressive strength; flexural strength; rigid pavement.

1. PENDAHULUAN

Produksi semen sebagai bahan utama dalam beton diketahui menyumbang emisi karbon yang tinggi, sementara fly ash sebagai bahan tambahan konvensional kini semakin terbatas akibat sifatnya yang tidak terbarukan. Dalam konteks ini, abu tongkol jagung (ATJ) hadir sebagai alternatif bahan tambahan yang lebih ramah lingkungan karena berasal dari limbah biomassa pertanian [1]. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa ATJ memiliki kandungan silika yang cukup tinggi, sehingga berpotensi berkontribusi dalam pembentukan senyawa pozzolanik pada beton. Penggunaan ATJ diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanis beton sekaligus mendukung efisiensi pemanfaatan material.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik fisik dan kimia ATJ sebagai bahan tambahan dalam campuran beton. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengevaluasi pengaruh penambahan ATJ dengan variasi 0%, 5%, 10%, 15%, hingga 20% terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton bio-komposit pada umur 7, 14, dan 28 hari. Dari hasil tersebut, akan ditentukan kadar ATJ yang optimal berdasarkan performa mekanis beton. Selanjutnya, dilakukan penilaian terhadap kelayakan penggunaan ATJ sebagai bahan tambahan untuk beton perkerasan kaku berdasarkan standar teknis yang berlaku.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Negeri Malang. Material yang digunakan meliputi semen Portland Tipe I (OPC), agregat halus (pasir Lumajang), agregat kasar (kerikil Pasuruan), air bersih, dan abu tongkol jagung (ATJ) yang dibakar pada suhu 650–800°C selama ±10 jam hingga diperoleh abu berwarna abu-abu keputihan.

Benda uji dibuat dalam dua bentuk: silinder (150 mm × 300 mm) untuk uji kuat tekan dan balok (100 mm × 100 mm × 350 mm) untuk uji kuat lentur. Campuran beton dirancang berdasarkan SNI 03-2834-2000 dengan variasi penambahan ATJ sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen. Seluruh benda uji direndam (curing) dan diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari.

Analisis sifat kimia ATJ dilakukan dengan X-Ray Fluorescence (XRF). Uji kuat tekan mengikuti prosedur ASTM C39, dan uji kuat lentur mengikuti ASTM C293/C293M. Data diuji secara statistik menggunakan ANOVA dua arah untuk menguji pengaruh variasi kadar ATJ dan umur terhadap sifat mekanis beton.

Persamaan kuat tekan yang digunakan:

$$f'c = P/A \quad (1)$$

dengan:

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

A = Luas penampang benda uji (mm²)

P = Beban tekan (N)

d = Diameter silinder (mm)

Metode pengujian untuk menentukan kekuatan lentur beton menggunakan balok sederhana dengan pembebanan di titik tengah (*Three-Point Bending Test*). Untuk itu, digunakan rumus:

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

dengan:

f_s = Kuat lentur beton (MPa)

p = Beban tertinggi yang ditunjukkan oleh mesin uji (kg)

a = Jarak rata-rata antara tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada sudut dari bentang (cm)

b = Lebar tampang lintang patah arah horizontal (cm)

h = Lebar tampang lintang patah arah vertikal

Analisis statistik dilakukan menggunakan ANOVA dua arah untuk menguji pengaruh variasi kadar ATJ dan umur beton terhadap sifat mekanis (kuat tekan dan kuat lentur). Kriteria pengujian:

- H_0 diterima jika $F_{hitung} \leq F_{tabel}$
- H_1 diterima jika $F_{hitung} \geq F_{tabel}$
- Jika $p\text{-value} < 0,05$ maka H_0 ditolak, artinya terdapat pengaruh signifikan
- Jika $p\text{-value} \geq 0,05$ maka H_0 diterima, artinya tidak terdapat pengaruh signifikan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Karakteristik Material

Hasil uji fisik agregat menunjukkan bahwa pasir Lumajang memiliki gradasi berada pada zona II sesuai SNI, berat jenis 2,666 g/cm³, dan kadar lumpur < 5%. Agregat kasar dari Pasuruan memiliki berat jenis SSD 2,832 g/cm³, penyerapan air 1,47%, dan lolos saringan maksimum 20 mm. Abu tongkol jagung yang digunakan memiliki berat jenis rata-rata 2,105 g/cm³ dan kandungan silika sebesar 26,59% menurut uji XRF (**Tabel 3**), cukup mendukung potensi reaksi pozzolanik meskipun tidak dominan.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Uji Fisik Agregat Kasar

Jenis Pengujian	Hasil	Satuan	Standar
Analisa Saringan	Uk. Butir 20 mm	-	SNI 03-2834-2000
Modulus Kehulusan	6.75	-	ASTM C-136-01

Kadar Air	1,27	%	ASTM C-556-67
Berat Jenis Kering	2,791	gr/cm ³	
Berat Jenis SSD	2,832	gr/cm ³	ASTM C-136-01
Berat Jenis Semu	2,911	gr/cm ³	
Penyerapan	1,474	%	ASTM C-128-01
Berat Isi Lepas	1,38	gr/cm ³	
Berat Isi Tumbuk	1,51	gr/cm ³	ASTM C-128-01
Berat Isi Goyang	1,53	gr/cm ³	

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Uji Fisik Agregat Halus

Jenis Pengujian	Hasil	Satuan	Spesifikasi
Analisa Saringan	Zona 2	-	SNI 03-2834-2000
Modulus Kehulusan	2,59	1,55-3,8	SII.0052
Kadar Air	2,24	%	ASTM C-556-67
Berat Jenis Kering	2,625	gr/cm ³	
Berat Jenis SSD	2,666	gr/cm ³	ASTM C-128-01
Berat Jenis Semu	2,737	gr/cm ³	
Penyerapan	1,551	%	ASTM C-128-01
Kadar Organik	No 1		ASTM C-49-99
Berat Isi Lepas	1,45	gr/cm ³	
Berat Isi Tumbuk	1,61	gr/cm ³	ASTM C-128-01
Berat Isi Goyang	1,60	gr/cm ³	

Tabel 3. Hasil XRF Abu Tongkol Jagung

Unsur Oksida	Kadar (%)
SiO ₂ (Silika)	26,59%
Al ₂ O ₃ (Alumina)	4,66%
Fe ₂ O ₃ (Ferrum oksida)	5,16%
K ₂ O (Kalium oksida)	7,72%
CaO (Kalsium oksida)	14,72%
MgO (Magnesium oksida)	6,48%
P ₂ O ₅ (Fosfor oksida)	8,29%
SO ₃	0,26%

Tabel 4. Hasil XRF Semen OPC

Unsur Oksida	Kadar (%)
CaO	56,38%
SiO ₂	17,54%
Al ₂ O ₃	4,12%
Fe ₂ O ₃	3,56%
MgO	1,75%
SO ₃	2,04%
Na ₂ O	0,43%

Mix Design

Mix design berikut disusun untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan abu tongkol jagung (ATJ) terhadap sifat mekanik beton, yaitu kuat tekan dan kuat lentur. Campuran disusun dengan mempertahankan jumlah semen yang sama pada setiap variasi, sementara ATJ ditambahkan sebagai substansi sebagian dari berat semen dalam persentase tertentu. Tabel berikut menunjukkan proporsi bahan untuk masing-masing variasi campuran yang digunakan dalam pengujian kuat tekan dan kuat lentur beton.

Tabel 5. Berat Proporsi Campuran untuk Pengujian Kuat Tekan (15 Benda Uji Setiap Variasi)

Type	Air (kg)	Semen (kg)	ATJ (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)
0%	17,667	35,864	0,000	67,384	96,107
5%	17,667	35,864	1,793	67,384	96,107
10%	17,667	35,864	3,586	67,384	96,107
15%	17,667	35,864	5,380	67,384	96,107
20%	17,667	35,864	7,173	67,384	96,107
Total	88,337	179,321	17,932	336,919	480,534

Tabel 6. Berat Proporsi Campuran untuk Pengujian Kuat Lentur (9 Benda Uji Setiap Variasi)

Type	Air (kg)	Semen (kg)	ATJ (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)
0%	6,998	14,207	0,000	26,692	38,070
5%	6,998	14,207	0,710	26,692	38,070
10%	6,998	14,207	1,421	26,692	38,070
15%	6,998	14,207	2,131	26,692	38,070
20%	6,998	14,207	2,841	26,692	38,070
Total	34,992	71,033	7,103	133,460	34,992

Kuat Tekan Beton

Hasil uji kuat tekan menunjukkan bahwa beton tanpa ATJ (0%) menghasilkan kuat tekan tertinggi yaitu 34,97 MPa pada umur 28 hari, namun beton dengan penambahan 5% ATJ mencatat kuat tekan terbaik kedua yaitu 23,93 MPa. Nilai ini masih di bawah standar minimum untuk perkerasan kaku (25 MPa). Penambahan lebih dari 5% menunjukkan tren penurunan kekuatan yang konsisten, diduga karena rasio CaO yang terlalu rendah dan kandungan K₂O yang tinggi dalam ATJ.

Tabel 7. Rekapitulasi Nilai Rata-Rata Kuat Tekan Beton

Variasi Abu Tongkol Jagung	Hari	Kuat Tekan (Mpa)
0%	7 Hari	22,66
	14 Hari	24,68
	28 Hari	34,97
5%	7 Hari	22,02
	14 Hari	22,86
	28 Hari	23,93
10%	7 Hari	19,08
	14 Hari	19,47
	28 Hari	23,19
15%	7 Hari	16,95
	14 Hari	17,84
	28 Hari	21,17
20%	7 Hari	16,91
	14 Hari	15,76
	28 Hari	20,62



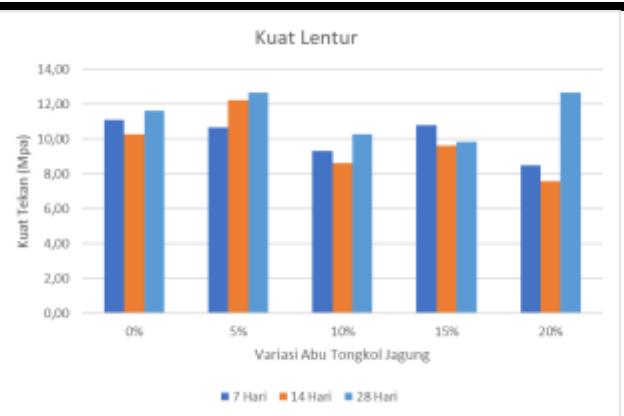
Gambar 1. Grafik Rekap Kuat Tekan Beton terhadap Variasi Abu Tongkol Jagung

Kuat Lentur Beton

Uji kuat lentur menunjukkan hasil tertinggi juga pada variasi 5% ATJ, yaitu 12,68 MPa pada umur 28 hari, melebihi nilai kontrol (11,63 MPa). Hal ini menunjukkan bahwa partikel halus ATJ mampu meningkatkan kohesi dan distribusi tegangan tarik lentur dalam beton. Namun, pada kadar >10%, nilai lentur menurun signifikan akibat penurunan integritas mikrostruktur.

Tabel 8. Rekapitulasi Nilai Rata-Rata Kuat Lentur Beton

Variasi Abu Tongkol Jagung	Hari	Kuat Lentur (Mpa)
0%	7 Hari	11,10
	14 Hari	10,28
	28 Hari	11,63
5%	7 Hari	10,68
	14 Hari	12,23
	28 Hari	12,68
10%	7 Hari	9,30
	14 Hari	8,63
	28 Hari	10,26
15%	7 Hari	10,80
	14 Hari	9,60
	28 Hari	9,83
20%	7 Hari	8,48
	14 Hari	7,58
	28 Hari	12,68



Gambar 2. Grafik Kuat Lentur Beton terhadap Variasi Abu Tongkol Jagung

Analisis Statistik ANOVA

Analisis Varians (ANOVA) digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi abu tongkol jagung (ATJ) terhadap kekuatan tekan dan lentur beton pada berbagai umur pengujian (7, 14, dan 28 hari). Hasil analisis ANOVA memberikan wawasan penting mengenai interaksi antara ATJ dan umur beton terhadap kekuatan mekanis beton biokomposit.

Kuat Tekan:

7 Hari: Hasil ANOVA menunjukkan bahwa variasi ATJ memberikan pengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton umur 7 hari, dengan nilai F hitung yang jauh lebih besar dibandingkan F tabel dan p-value yang sangat kecil ($p < 0,05$). Ini mengindikasikan bahwa ATJ pada variasi tertentu dapat meningkatkan kekuatan tekan beton pada tahap awal pengerasan. Efek ini bisa dijelaskan dengan proses hidrasi semen yang lebih aktif akibat reaksi kimia dengan ATJ yang berfungsi sebagai bahan pozzolan.

14 Hari: Pada umur 14 hari, hasil ANOVA kembali menunjukkan pengaruh signifikan variasi ATJ terhadap kuat tekan beton. Hal ini penting karena umur 14 hari sering digunakan sebagai indikator kestabilan kekuatan beton dalam aplikasi praktis. Diperlukan pemahaman lebih lanjut mengenai pengaruh ATJ terhadap mikrostruktur beton pada periode ini, yang bisa jadi mempercepat perkembangan kekuatan beton melalui reaksi pozzolan yang lebih sempurna.

28 Hari: Hasil ANOVA pada umur 28 hari juga menunjukkan pengaruh signifikan, yang sejalan dengan literatur yang menyatakan bahwa bahan tambahan seperti ATJ dapat memperbaiki sifat mekanis beton setelah proses pengerasan mencapai puncaknya. Walaupun ATJ memberikan hasil yang cukup baik pada umur 28 hari, temuan ini tetap relevan dalam konteks pengembangan bahan beton ramah lingkungan.

Kuat Lentur:

7 Hari: Hasil ANOVA menunjukkan tidak ada pengaruh signifikan variasi ATJ terhadap kuat lentur beton pada umur 7 hari. Nilai $p > 0,05$ mengindikasikan bahwa pada tahap awal pengerasan, pengaruh ATJ terhadap kekuatan lentur beton belum dapat diukur dengan signifikan. Ini bisa dijelaskan dengan ketidaksempurnaan reaksi pozzolan pada umur tersebut.

14 Hari: Namun, pada umur 14 hari, ATJ memberikan pengaruh signifikan terhadap kuat lentur beton, dengan nilai $p < 0,05$. Hasil ini mengonfirmasi bahwa pada umur 14 hari, beton mulai menunjukkan karakteristik mekanis yang lebih baik, dan ATJ berkontribusi dalam memperbaiki kekuatan lentur. Ini juga menunjukkan bahwa pengaruh ATJ terhadap beton dapat lebih terasa pada tahap peralihan, ketika reaksi kimia dalam beton mulai menyelesaikan prosesnya.

28 Hari: Meskipun pada umur 28 hari terdapat penurunan dalam kekuatan lentur (meskipun marginal), hasil ANOVA menyatakan bahwa variasi ATJ tidak memberikan pengaruh signifikan pada kuat lentur pada umur ini. Hasil ini dapat memberikan wawasan mengenai batas optimal pengaruh ATJ terhadap beton, yang mungkin lebih terbatas dibandingkan dengan pengaruhnya terhadap kuat tekan.

Analisis Statistik Regresi

Analisis regresi linier sederhana digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara kuat tekan (X) dan kuat lentur (Y) pada umur 7, 14, dan 28 hari.

Regresi Umur 7 Hari:

Hasil regresi pada umur 7 hari menunjukkan bahwa meskipun hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur terlihat positif (koefisien regresi 0,248), model regresi tidak signifikan secara statistik (p -value = 0,285). Ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat kecenderungan hubungan yang searah, pengaruh kuat tekan terhadap kuat lentur belum cukup kuat untuk memberikan prediksi yang dapat diandalkan pada tahap awal pengerasan beton. Model regresi

ini lebih bersifat deskriptif daripada prediktif, dan tidak dapat digunakan untuk estimasi lebih lanjut.

Regresi Umur 14 Hari:

Pada umur 14 hari, koefisien regresi yang lebih besar (0,373) menunjukkan hubungan yang lebih kuat antara kuat tekan dan kuat lentur dibandingkan dengan umur 7 hari. Namun, meskipun nilai R^2 cukup tinggi (0,594), nilai Significance F yang lebih besar dari 0,05 ($p = 0,126$) mengindikasikan bahwa hubungan ini tidak cukup kuat secara statistik untuk digunakan dalam prediksi praktis. Secara teoritis, ini menyarankan bahwa meskipun kuat tekan mungkin berpengaruh terhadap kuat lentur, faktor-faktor lain yang mempengaruhi kuat lentur beton harus diperhitungkan lebih lanjut.

Regresi Umur 28 Hari:

Pada umur 28 hari, persamaan regresi yang diperoleh menunjukkan hubungan yang sangat lemah (koefisien regresi 0,025), dengan nilai R^2 yang sangat rendah (0,012), yang berarti sebagian besar variasi kuat lentur tidak dapat dijelaskan oleh kuat tekan. Hal ini menunjukkan bahwa pada umur yang lebih matang, kuat tekan tidak lagi menjadi prediktor yang relevan untuk kuat lentur. Model regresi ini tidak dapat digunakan untuk tujuan prediksi atau interpretasi lebih lanjut, dan menandakan bahwa faktor lain yang belum dipertimbangkan mungkin lebih berpengaruh pada umur 28 hari.

Rencana Anggaran Biaya (RAB)

Estimasi RAB dilakukan untuk tiap variasi ATJ berdasarkan kebutuhan bahan per m^3 dan harga satuan bahan (mengacu pada HSPK Malang 2024). Biaya per m^3 meningkat seiring naiknya kadar ATJ karena ATJ dihitung sebagai material aktif. Biaya paling efisien tercatat pada variasi 0%, sedangkan biaya tertinggi pada variasi 20% karena konsumsi ATJ yang tinggi. Perbandingan biaya ini menunjukkan bahwa variasi 5% memberikan keseimbangan terbaik antara performa dan efisiensi biaya.

Tabel 9. RAB Bahan per Variasi – Kuat Tekan

Variasi	Biaya Air (Rp)	Biaya Semen (Rp)	Biaya ATJ (Rp)	Biaya Pasir (Rp)	Biaya Kerikil (Rp)	Total Biaya (Rp)	Volume (m ³)	Biaya per m ³ (Rp)
0%	247,34	59.677,70	-	56.130,87	72.080,25	188.136	0,08745	2.151.356,84
5%	247,34	59.677,70	1.255,10	56.130,87	72.080,25	189.391	0,08745	2.165.709,05
10%	247,34	59.677,70	2.510,20	56.130,87	72.080,25	190.646	0,08745	2.180.061,25
15%	247,34	59.677,70	3.766,00	56.130,87	72.080,25	191.902	0,08745	2.194.421,45
20%	247,34	59.677,70	5.021,10	56.130,87	72.080,25	193.157	0,08745	2.208.773,65

Tabel 10. RAB Bahan per Variasi – Kuat Lentur

Variasi	Biaya Air (Rp)	Biaya Semen (Rp)	Biaya ATJ (Rp)	Biaya Pasir (Rp)	Biaya Kerikil (Rp)	Total Biaya (Rp)	Volume (m ³)	Biaya per m ³ (Rp)
0%	97,97	23.640,45	-	22.234,44	28.552,50	74.525	0,03465	2.150.803,92
5%	97,97	23.640,45	497,00	22.234,44	28.552,50	75.022	0,03465	2.165.147,36
10%	97,97	23.640,45	994,70	22.234,44	28.552,50	75.520	0,03465	2.179.511,00
15%	97,97	23.640,45	1.491,70	22.234,44	28.552,50	76.017	0,03465	2.193.854,43
20%	97,97	23.640,45	1.988,70	22.234,44	28.552,50	76.514	0,03465	2.208.197,86

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, analisis data, dan pembahasan pada beton bio-komposit dengan variasi penambahan abu tongkol jagung sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Abu tongkol jagung (ATJ) memiliki berat jenis 2,105 g/cm³ dengan kandungan silika 26,59% dan CaO 14,72%, menjadikannya berpotensi sebagai bahan pozzolan alternatif pengganti fly ash. Namun, kandungan CaO yang relatif rendah membatasi reaktivitasnya, sehingga penggunaannya perlu dibatasi.
2. Penambahan ATJ berpengaruh signifikan terhadap kekuatan beton. Beton kontrol (0%) mencapai kuat tekan

34,97 MPa, sementara beton dengan 5% ATJ menurun menjadi 23,93 MPa (turun 31,5%). Kuat tekan terus menurun pada kadar 10–20% ATJ. Kuat lentur tertinggi tercapai pada 5% ATJ (12,68 MPa).

3. Penambahan ATJ cenderung menurunkan kuat tekan secara progresif: 10% ATJ (23,19 MPa), 15% (21,13 MPa), dan 20% (20,62 MPa). Artinya, semakin tinggi kadar ATJ, semakin besar penurunan kekuatan tekan.
4. Beton dengan 5% ATJ masih menghasilkan kuat lentur tinggi, namun tidak memenuhi standar kuat tekan minimum 25 MPa untuk perkerasan kaku (SNI 1979:2011). Maka, kadar optimal ATJ disarankan <5% untuk menjaga performa mekanis beton.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gradinaru, M., et al. (2018). *Corn Cob Ash as Sustainable Pozzolanic Material for an Ecological Concrete*. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, 11(60).
- [2] ASTM C39/C39M. (2023). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.
- [3] ASTM C293/C293M. (2023). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)*. ASTM International.
- [4] SNI 03-2834-2000. *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Badan Standardisasi Nasional.