

EVALUASI KUAT TEKAN, DENSITAS, DAN VARIABILITAS BETON RENCANA K-225 PADA VARIASI CAMPURAN MORTAR BETON

Surya Adinata^{1*}, Meirantika Putri²

¹²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Kuantan Singingi

Jl. Gatot Subroto KM 7, Jake, Teluk Kuantan, Kabupaten Kuantan Singingi, Riau 29569, Indonesia

*Korespondensi: suryaadinatashineandrise@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi kembali data hasil uji kuat tekan beton rencana K-225 yang berasal dari empat kelompok praktikum dengan campuran dan umur pengujian berbeda. Sebanyak 16 benda uji kubus berukuran $150 \times 150 \times 150$ mm dianalisis pada umur 24, 31, 50, dan 91 hari. Kelompok yang dikaji terdiri atas beton normal, beton ringan dengan abu boiler dan foam agent, beton dengan abu cadas, serta beton berserat sabut kelapa. Data beban maksimum dihitung ulang menggunakan luas tekan aktual 225 cm^2 , sedangkan densitas dihitung dari massa dan volume benda uji. Analisis meliputi nilai rata-rata, simpangan baku, koefisien variasi, rasio pencapaian terhadap nilai nominal K-225, serta hubungan densitas-kuat tekan. Hasil menunjukkan densitas rata-rata $1.518,52 \text{ kg/m}^3$ - $2.157,63 \text{ kg/m}^3$ dan kuat tekan rata-rata 5,72 MPa - 8,11 MPa. Kelompok abu cadas umur 50 hari menghasilkan rata-rata tertinggi sebesar 8,11 MPa, sedangkan beton ringan abu boiler dan foam agent umur 91 hari menghasilkan rata-rata terendah sebesar 5,72 MPa. Seluruh kelompok hanya mencapai 25,9% - 36,8% dari nilai nominal K-225 (22,06 MPa). Koefisien variasi berkisar 12,12 - 38,49%, yang menunjukkan ketidakteraturan cukup besar pada sebagian kelompok. Hubungan densitas dan kuat tekan bersifat positif sedang ($r = 0,49$; $R^2 = 0,24$), tetapi belum kuat secara statistik. Karena umur pengujian tidak dikontrol pada campuran yang sama, pengaruh umur dan pengaruh komposisi tidak dapat dipisahkan secara kausal. Temuan ini menegaskan perlunya standardisasi mix design, pemadatan, curing, pencatatan material, dan replikasi pengujian untuk mencapai mutu rencana secara konsisten.

Kata kunci: Beton K-225, Kuat Tekan, Densitas, Koefisien Variasi, Pengendalian Mutu.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material komposit yang sifat mekaniknya ditentukan oleh interaksi pasta semen, agregat, air, rongga, dan bahan tambah. Kuat tekan menjadi parameter utama dalam evaluasi mutu karena merepresentasikan kemampuan material menahan tegangan tekan sebelum mengalami keruntuhan. Nilai tersebut dipengaruhi oleh faktor air-semen, mutu dan gradasi agregat, homogenitas pengadukan, pemadatan, curing, bentuk benda uji, laju pembebanan, dan umur pengujian [1], [2]. Oleh sebab itu, interpretasi kuat tekan tidak cukup hanya menggunakan nilai beban maksimum; konsistensi prosedur dan keterlacakan data campuran juga harus diperiksa.

Beton berbuis atau foamed concrete memanfaatkan rongga udara terkontrol untuk menurunkan densitas. Rentang densitasnya dapat sangat luas, dan penurunan densitas umumnya diikuti penurunan kuat tekan karena meningkatnya volume pori dan menurunnya luas penampang efektif yang memikul beban [3]–[5]. Pada material semacam ini, jenis foam agent, kestabilan busa, faktor air-semen, dan kondisi curing berpengaruh besar terhadap perkembangan kekuatan [4]. Dengan demikian, beton ringan tidak dapat dinilai hanya dari penurunan massa; kinerja mekanik dan keseragaman internal tetap harus diverifikasi.

Pemanfaatan abu hasil pembakaran biomassa, termasuk palm oil fuel ash (POFA), telah banyak dikaji sebagai bahan pengganti sebagian semen. Kinerja POFA bergantung pada komposisi kimia, kadar karbon tak terbakar, kehalusan, perlakuan awal, kadar substitusi, dan rasio air-binder [6]–[8]. Dalam naskah sumber, istilah “abu boiler” dan “foam agent” sempat dicampur dengan istilah POFA. Secara ilmiah, keduanya berbeda: POFA merupakan material abu padat hasil pembakaran biomassa sawit, sedangkan foam agent merupakan bahan pembentuk gelembung. Koreksi terminologi ini diperlukan agar mekanisme setiap bahan tidak disalahartikan.

Serat sabut kelapa dapat berfungsi sebagai penghambat propagasi retak dan meningkatkan ketangguhan, tetapi pengaruhnya terhadap kuat tekan tidak selalu positif. Dosis berlebih, dispersi yang buruk, penyerapan air tinggi, dan ikatan antarmuka yang lemah dapat meningkatkan rongga atau menurunkan workability [9], [10]. Oleh karena itu, evaluasi beton berserat perlu menyertakan kadar serat, panjang, kondisi permukaan, metode pencampuran, dan kontrol pada umur yang sama.

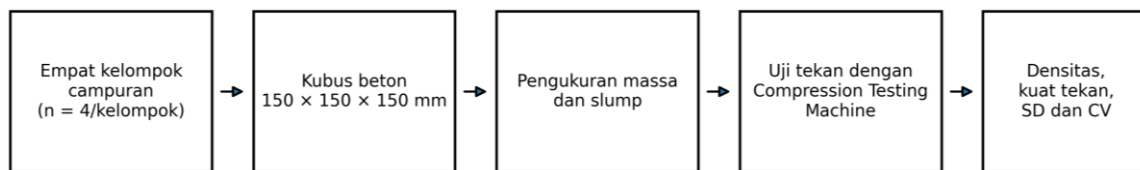
Data awal penelitian ini berasal dari empat laporan praktikum yang disusun pada waktu dan komposisi berbeda. Draft awal menyimpulkan bahwa kuat tekan meningkat seiring umur beton. Kesimpulan tersebut belum dapat dipertahankan karena setiap umur mewakili campuran yang berbeda. Penelitian ini kemudian diarahkan sebagai evaluasi

deskriptif dan audit mutu data laboratorium. Kontribusinya adalah: (1) menghitung ulang kuat tekan langsung dari beban maksimum, (2) menghitung densitas berdasarkan massa dan volume aktual, (3) mengevaluasi variasi antarspesimen, (4) membandingkan hasil dengan nilai nominal K-225, dan (5) mengidentifikasi keterbatasan rancangan yang harus diperbaiki pada penelitian lanjutan.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain penelitian dan sumber data

Penelitian menggunakan pendekatan evaluatif-deskriptif berbasis data primer eksperimen laboratorium. Data bersumber dari empat kelompok laporan praktikum Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Kuantan Singingi. Setiap kelompok terdiri atas empat benda uji sehingga jumlah keseluruhan adalah 16 kubus. Penelitian ini bukan eksperimen faktorial terkontrol karena komposisi dan umur pengujian berubah secara bersamaan. Oleh sebab itu, analisis diarahkan pada perbandingan deskriptif, bukan penetapan hubungan sebab-akibat.



Gambar 1. Kerangka evaluasi data laboratorium.

Sumber: hasil pengolahan data penulis (2026).

Kerangka evaluasi mencakup 4 kelompok campuran dengan 4 benda uji pada setiap kelompok, sehingga jumlah keseluruhan adalah 16 kubus. Umur pengujian aktual terdiri atas 24, 31, 50, dan 91 hari. Setiap kubus berukuran $150 \times 150 \times 150$ mm, memiliki luas bidang tekan 225 cm^2 dan volume $0,003375 \text{ m}^3$. Data yang dievaluasi meliputi massa, densitas, beban maksimum, kuat tekan, nilai rata-rata, simpangan baku, koefisien variasi, dan persentase pencapaian terhadap nilai nominal K-225 sebesar 225 kg/cm^2 atau $22,06 \text{ MPa}$.

2.2 Benda uji dan kelompok pengujian

Seluruh benda uji berbentuk kubus berukuran $150 \times 150 \times 150$ mm dengan luas bidang tekan 225 cm^2 dan volume $0,003375 \text{ m}^3$. Pengujian dilakukan menggunakan Compression Testing Machine (CTM). Umur aktual ditentukan dari tanggal pembuatan dan tanggal pengujian, yaitu 24, 31, 50, dan 91 hari. Data umur 31 hari digunakan menggantikan penyebutan 28 hari pada abstrak draft awal karena tanggal 29 Desember 2025 sampai 29 Januari 2026 menunjukkan interval 31 hari.

Tabel 1. Karakteristik kelompok data yang dievaluasi.

Kode	Jenis campuran	Umur (hari)	n	Slump (cm)	Keterangan data
BRF-91	Beton ringan abu boiler + foam agent	91	4	15.0	Istilah abu boiler dipertahankan; karakterisasi sebagai POFA belum tersedia.
BN-31	Beton normal	31	4	6.5	Dipetakan sebagai beton normal berdasarkan urutan judul tabel pada naskah sumber.
BAC-50	Beton dengan abu cadas	50	4	12.0	Nama material “abu cadas”
BSK-24	Beton serat sabut kelapa	24	4	12.0	Kadar, panjang, dan perlakuan serat tidak tercantum dalam data sumber.

Sumber: kompilasi dan koreksi dari data laporan praktikum (2026).

2.3 Dokumentasi bahan, peralatan, dan tahapan eksperimen

Dokumentasi fotografis disediakan untuk memperkuat keterlacakan bahan, peralatan, dan prosedur eksperimen. Foto yang digunakan harus merupakan dokumentasi asli kegiatan praktikum, bukan gambar ilustrasi dari internet. Setiap foto perlu memperlihatkan kondisi material, alat, tahapan pekerjaan, dan identitas benda uji secara cukup jelas.

Pengadukan aktual dilakukan di dalam ember pencampur berkapasitas besar menggunakan bor listrik berkecepatan variabel yang dilengkapi mata pengaduk mortar (mixing paddle). Bahan kering dihomogenkan terlebih dahulu, kemudian air dan bahan tambah dimasukkan secara bertahap sampai adukan merata. Adukan segar selanjutnya diperiksa kecacakannya, dimasukkan ke cetakan kubus $150 \times 150 \times 150$ mm, dipadatkan, diratakan, dan diberi identitas. Setelah dilepas dari cetakan, benda uji direndam sampai umur pengujian. Sebelum uji tekan, benda uji dikeluarkan dari bak,

dibersihkan atau dilap permukaannya, diukur, ditimbang, diletakkan sentris pada CTM, kemudian dibebani sampai mengalami keruntuhan.



(a) POFA atau abu boiler yang digunakan.



(b) Batu cadas atau abu cadas.



(c) Serat sabut kelapa sebelum pencampuran.



(d) Semen sebagai bahan pengikat.



(e) Pasir yang digunakan dalam campuran.



(f) Air yang digunakan untuk pencampuran.



(g) Foam agent atau bahan tambah cair.



(h) Foam agent dicampurkan ke mortar

Gambar 2. Dokumentasi asli bahan penyusun dan bahan tambah pada variasi campuran beton.

Sumber: dokumentasi penulis (2025–2026).

Penjelasan teknis Gambar 2. Dokumentasi bahan perlu memperlihatkan sekurang-kurangnya beberapa komponen, yaitu semen, pasir, agregat kasar, air, abu boiler/POFA, batu atau abu cadas, serat sabut kelapa, dan foam agent atau bahan tambah cair. Keempat kelompok campuran yang dianalisis adalah BRF-91, BN-31, BAC-50, dan BSK-24. Karena massa dan persentase setiap bahan belum tercantum dalam laporan sumber, setiap foto akhir sebaiknya dilengkapi label nama material, asal material, kondisi kering/basah, ukuran maksimum atau panjang serat, serta massa atau dosis aktual. Angka komposisi tidak boleh dicantumkan sebelum diverifikasi dari lembar penimbangan.



(a) Penimbangan masing-masing material.



(b) Bor listrik yang digunakan untuk mengaduk.



(c) Pemberian serat kelapa pada adonan mortar



(d) Pengadukan manual.

Gambar 3. Peralatan pencampuran dan proses pengadukan menggunakan bor listrik dengan mata pengaduk mortar di dalam ember besar dan pengadukan manual. Sumber: dokumentasi penulis (2025–2026).

Penjelasan teknis Gambar 3. Pencampuran dilakukan menggunakan pengadukan manual dan bor listrik yang dipasang mata pengaduk mortar (mixing paddle) di dalam ember besar. Metode ini digunakan untuk menghomogenkan bahan kering dan adonan basah pada 4 kelompok campuran. Untuk menjamin keterulangan eksperimen, foto alat perlu disertai data kapasitas ember (Liter), daya bor (Watt), rentang putaran (rpm), diameter mata pengaduk (mm), waktu pengadukan kering (menit), dan waktu pengadukan setelah penambahan air (menit). Ruang kosong tersebut harus diisi berdasarkan spesifikasi alat dan catatan praktikum, bukan berdasarkan perkiraan.



(a) Pengukuran nilai slump adonan segar.



(b) Cetakan kubus 150 × 150 × 150 mm



(c) Pemasukan adonan ke dalam cetakan kubus.



(d) Mortar dalam cetakan kubus.

Gambar 4. Tahapan pemeriksaan slump, pencetakan, pemadatan, perataan, dan pemberian identitas benda uji kubus. Sumber: dokumentasi penulis (2025–2026).

Penjelasan teknis Gambar 4. Nilai slump yang tercatat adalah 15,0 cm untuk BRF-91, 6,5 cm untuk BN-31, serta 12,0 cm untuk BAC-50 dan BSK-24. Sebanyak 16 benda uji dicetak menggunakan cetakan kubus 150 mm, masing-masing 4 kubus per kelompok. Volume geometris satu kubus adalah 3,375 L sehingga kebutuhan adukan minimum untuk 4 kubus adalah 13,50 L, belum termasuk kehilangan adukan selama pencampuran dan pemadatan.



(a) Pemeriksaan visual serta kode benda uji.



(b) Benda uji kubus di dalam air

Gambar 5. Pelepasan cetakan, identifikasi, perendaman, dan persiapan benda uji setelah curing.

Sumber: dokumentasi penulis (2025–2026).

Penjelasan teknis Gambar 5. Benda uji dilepas dari cetakan setelah beton cukup mengeras, kemudian menjalani curing sampai umur pengujian 24, 31, 50, atau 91 hari sesuai kelompoknya. Massa individual setelah curing berada pada rentang 4,800 kg–7,369 kg. Dengan volume kubus 0,003375 m³, densitas individual pada rentang 1.422,22kg/m³–2.183,41 kg/m³. Sebelum pengujian, permukaan benda uji perlu dilap, kode diperiksa, dimensi diukur ulang, dan waktu pengeluaran dari bak perendaman dicatat agar kondisi kelembapan antarspesimen lebih seragam.



(a) Penimbangan massa benda uji.



(b) Pembebanan tekan sampai benda uji runtuh.

Gambar 6. Persiapan benda uji dan pelaksanaan pengujian kuat tekan menggunakan Compression Testing Machine.

Sumber: dokumentasi penulis (2025–2026).

Penjelasan teknis Gambar 6. Pengujian dilakukan dengan menempatkan kubus secara sentris pada pelat Compression Testing Machine. Luas bidang tekan yang digunakan dalam perhitungan adalah 225 cm² atau 0,0225 m². Beban maksimum 16 spesimen berada pada rentang 60 kN–225 kN dan menghasilkan kuat tekan 2,67MPa–10,00 MPa. Foto akhir memperlihatkan identitas CTM, kapasitas alat (kN), tanggal kalibrasi, posisi kubus, tampilan beban maksimum, dan kondisi benda uji segera setelah pembebanan selesai.



(a) Pola kehancuran beton ringan



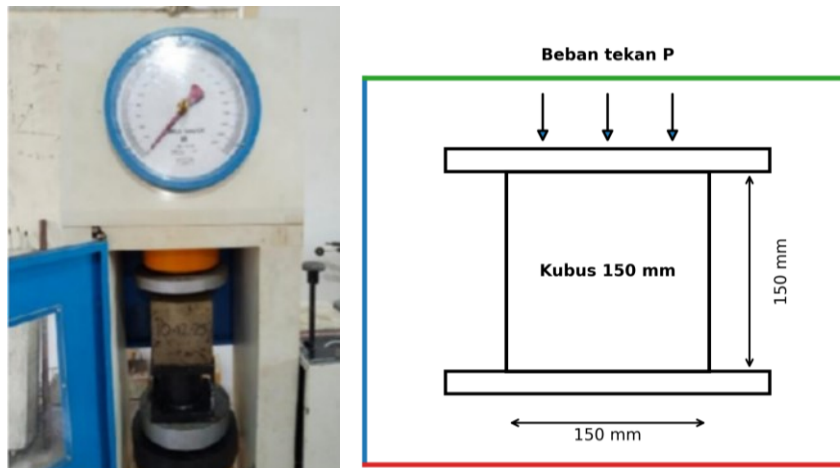
(b) Pola kehancuran beton normal.

Gambar 7. Perbandingan dokumentasi pola kehancuran kubus pada empat kelompok campuran setelah uji tekan.

Sumber: dokumentasi penulis (2025–2026).

Penjelasan teknis Gambar 7. Foto pola kehancuran harus dikelompokkan menurut kode campuran dan dikaitkan dengan hasil statistik. BRF-91 memiliki kuat tekan rata-rata 5,72 MPa dengan CV 38,49%; BN-31 sebesar 6,06 MPa dengan CV 12,12%; BAC-50 sebesar 8,11 MPa dengan CV 26,89%; dan BSK-24 sebesar 7,89 MPa dengan CV 24,18%. Dokumentasi perlu memperlihatkan retak vertikal, pengelupasan sudut, keruntuhan geser, atau pecah tidak simetris apabila benar-benar terlihat. Pola visual tidak boleh diklasifikasikan tanpa foto yang cukup jelas dari sedikitnya dua sisi benda uji.

Skema prinsip pembebanan kubus pada CTM ditunjukkan pada Gambar 8. Skema tersebut melengkapi dokumentasi asli dan memperjelas bahwa beban tekan diterapkan tegak lurus terhadap bidang tekan benda uji.



Gambar 8. Skema pengujian kuat tekan benda uji kubus.
Sumber: hasil pengolahan data penulis (2026).

Penjelasan teknis Gambar 8. Prinsip pengujian mengikuti hubungan $f_{cu} = P/A$. Untuk kubus dengan $A = 0,0225 \text{ m}^2$, beban 165 kN menghasilkan $f_{cu} = 165.000/0,0225 = 7,33 \text{ MPa}$, sedangkan beban 225 kN menghasilkan 10,00 MPa. Contoh tersebut menunjukkan bahwa nilai kuat tekan dihitung langsung dari beban maksimum dan luas aktual, tanpa faktor koreksi umur yang tidak terdokumentasi. Kesentrisan pembebanan dan kerataan bidang kontak harus dijaga karena eksentrisitas dapat meningkatkan penyebaran hasil.

2.4 Pengolahan data

Beban maksimum yang tercatat dalam kN dikonversi menjadi kgf menggunakan faktor $1 \text{ kN} = 101,9716 \text{ kgf}$. Nilai kuat tekan kubus dihitung langsung dari rasio beban maksimum terhadap luas bidang tekan. Penggunaan nilai hasil hitung langsung dipilih agar tidak tercampur dengan faktor koreksi umur yang pada draft awal tidak dijelaskan secara konsisten.

$$f_{cu} = P / A \quad (1)$$

dengan f_{cu} adalah kuat tekan kubus (kg/cm^2), P adalah beban maksimum (kgf), dan A adalah luas bidang tekan sebesar 225 cm^2 . Nilai kg/cm^2 kemudian dikonversi ke MPa menggunakan $1 \text{ kg/cm}^2 = 0,0980665 \text{ MPa}$.

Densitas dihitung dari massa benda uji dibagi volume kubus:

$$\rho = m / V \quad (2)$$

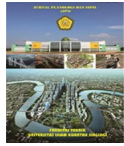
dengan ρ adalah densitas (kg/m^3), m adalah massa benda uji (kg), dan V adalah volume benda uji (m^3). Konsistensi hasil dinilai menggunakan simpangan baku dan koefisien variasi (CV):

$$CV = (s / \bar{x}) \times 100\% \quad (3)$$

Rasio pencapaian terhadap nilai nominal K-225 dihitung sebagai perbandingan kuat tekan rata-rata kelompok terhadap 225 kg/cm^2 . Nilai K-225 dikonversi menjadi $22,06 \text{ MPa}$. Karena ukuran sampel hanya empat per kelompok dan kelompok tidak memiliki umur yang sama, hasil tidak digunakan untuk menentukan kuat tekan karakteristik atau menyatakan keunggulan kausal suatu bahan.

2.5 Acuan pengujian dan batasan metodologis

Praktik pengujian kubus 150 mm dan perhitungan P/A dikenal dalam SNI 03-1974-1990 [11], tetapi standar tersebut saat ini berstatus tidak berlaku. Standar yang berlaku adalah SNI 1974:2023 untuk spesimen silinder [12]. Data historis pada penelitian ini tetap diolah sebagai kuat tekan kubus karena bentuk benda uji tidak dapat diubah secara retrospektif. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan bentuk spesimen, persiapan permukaan, laju pembebanan, dan pelaporan sesuai standar terbaru.



Keterbatasan utama meliputi tidak tersedianya rincian mix design, faktor air-semen, kadar abu, dosis foam agent, kadar dan panjang serat, metode curing yang terukur, kalibrasi mesin. Selain itu, pemetaan data umur 31 hari sebagai beton normal dan umur 50 hari sebagai beton abu cadas mengikuti urutan judul tabel pada draft awal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Rekalkulasi data individual

Rekalkulasi menghasilkan kuat tekan aktual 2,67 MPa–10,00 MPa. Penggunaan nilai langsung ini mengoreksi ketidakkonsistenan pada draft awal, terutama pada kelompok umur 24 dan 50 hari yang memuat nilai “kuat tekan umur ekuivalen” tanpa faktor koreksi yang jelas. Data individual yang digunakan untuk analisis ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data individual hasil rekalkulasi densitas dan kuat tekan.

Kode	No.	Umur (hari)	Slump (cm)	Massa (kg)	Densitas (kg/m ³)	Beban (kN)	Kuat tekan (MPa)
BRF-91	1	91	15.0	4.800	1.422,22	60	2,67
BRF-91	2	91	15.0	5.200	1.540,74	165	7,33
BRF-91	3	91	15.0	5.200	1.540,74	165	7,33
BRF-91	4	91	15.0	5.300	1.570,37	125	5,56
BN-31	1	31	6.5	6.890	2.041,48	155	6,89
BN-31	2	31	6.5	6.550	1.940,74	115	5,11
BN-31	3	31	6.5	6.725	1.992,59	135	6,00
BN-31	4	31	6.5	6.480	1.920,00	140	6,22
BAC-50	1	50	12.0	7.364	2.181,93	215	9,56
BAC-50	2	50	12.0	7.225	2.140,74	110	4,89
BAC-50	3	50	12.0	7.369	2.183,41	195	8,67
BAC-50	4	50	12.0	7.170	2.124,44	210	9,33
BSK-24	1	24	12.0	6.700	1.985,19	155	6,89
BSK-24	2	24	12.0	6.647	1.969,48	225	10,00

Kode	No.	Umur (hari)	Slump (cm)	Massa (kg)	Densitas (kg/m ³)	Beban (kN)	Kuat tekan (MPa)
BSK-24	3	24	12.0	6.746	1.998,81	200	8,89
BSK-24	4	24	12.0	6.646	1.969,19	130	5,78

Sumber: hasil pengolahan data penulis (2026).

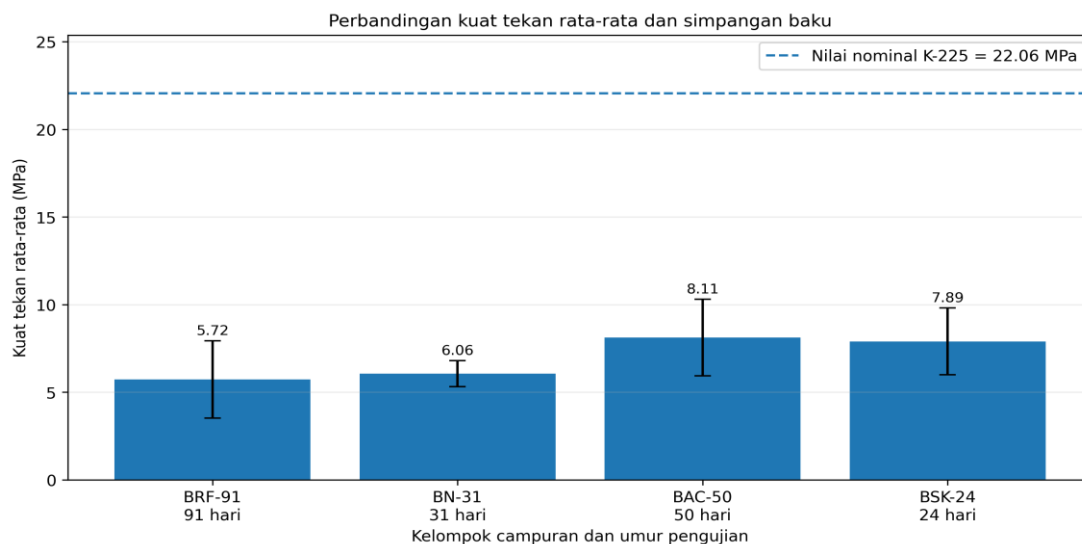
3.2 Densitas dan kuat tekan rata-rata

Ringkasan statistik menunjukkan perbedaan densitas yang jelas antar kelompok. BRF-91 memiliki densitas rata-rata 1.518,52 kg/m³ sehingga secara densitas berada dalam rentang beton ringan berbusa yang banyak dilaporkan dalam literatur [3], [5]. Tiga kelompok lain memiliki densitas sekitar 1.974–2.158 kg/m³ dan lebih dekat dengan beton berbobot normal daripada beton ringan. Dengan demikian, penyebutan seluruh variasi sebagai “beton ringan” tidak tepat.

Tabel 3. Statistik deskriptif setiap kelompok.

Kode	Umur	Densitas rata-rata (kg/m ³)	Kuat tekan rata-rata (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	Min. (MPa)	Maks. (MPa)	Pencapaian K-225 (%)
BRF-91	91	1.518,52	5,72	2,20	38,49	2,67	7,33	25,9
BN-31	31	1.973,70	6,06	0,73	12,12	5,11	6,89	27,4
BAC-50	50	2.157,63	8,11	2,18	26,89	4,89	9,56	36,8
BSK-24	24	1.980,67	7,89	1,91	24,18	5,78	10,00	35,8

Sumber: hasil pengolahan data penulis (2026).



Gambar 9. Perbandingan kuat tekan rata-rata, simpangan baku, dan nilai nominal K-225.

Sumber: hasil pengolahan data penulis (2026).

Penjelasan teknis Gambar 9. Kuat tekan rata-rata BRF-91, BN-31, BAC-50, dan BSK-24 berturut-turut adalah 5,72; 6,06; 8,11; dan 7,89 MPa. Dibandingkan nilai nominal K-225 sebesar 22,06 MPa, selisih kekuatannya masing-masing adalah 16,34; 16,00; 13,95; dan 14,17 MPa. Persentase pencapaian hanya 25,9%; 27,4%; 36,8%; dan 35,8%. Batang simpangan baku sebesar 2,20; 0,73; 2,18; dan 1,91 MPa memperlihatkan bahwa BN-31 merupakan kelompok paling seragam, meskipun tetap belum mencapai target.

Kelompok BAC-50 menghasilkan kuat tekan rata-rata tertinggi, yaitu 8,11 MPa, diikuti BSK-24 sebesar 7,89 MPa, BN-31 sebesar 6,06 MPa, dan BRF-91 sebesar 5,72 MPa. Namun, peringkat ini tidak dapat langsung diartikan sebagai pengaruh material karena umur pengujian, komposisi, dan kemungkinan prosedur pencampuran berbeda. Secara khusus, BSK-24 tidak dapat dinyatakan lebih baik akibat serat sabut kelapa tanpa pembanding beton tanpa serat pada umur 24 hari dengan mix design yang identik.

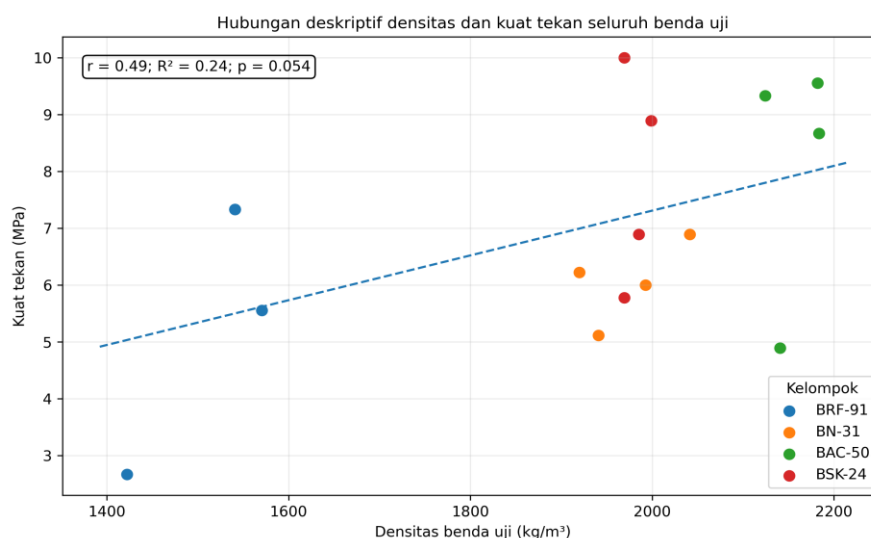
BRF-91 memperlihatkan kompromi antara pengurangan densitas dan kehilangan kekuatan. Densitasnya sekitar 23% lebih rendah daripada BN-31, tetapi kuat tekan rata-ratanya juga rendah. Tren ini konsisten dengan mekanisme beton berbuisa, yaitu peningkatan volume rongga menurunkan massa jenis sekaligus mengurangi area padat yang mentransfer tegangan [3]–[5]. Meskipun demikian, data ini belum cukup untuk menentukan aplikasi struktural atau nonstruktural karena parameter durabilitas, penyerapan air, modulus elastisitas, dan pola kegagalan tidak tersedia.

3.3 Variabilitas dan konsistensi mutu

BN-31 memiliki CV terendah sebesar 12,12%, yang menunjukkan penyebaran data paling sempit di antara empat kelompok, meskipun nilai rata-ratanya tetap jauh dari mutu rencana. BRF-91 memiliki CV tertinggi sebesar 38,49%, disusul BAC-50 sebesar 26,89% dan BSK-24 sebesar 24,18%. Variasi yang besar dapat berasal dari ketidakseragaman pemadatan, distribusi pori atau serat, perbedaan kelembapan benda uji, ketidakratahan bidang tekan, atau prosedur pembebanan. Karena data proses tidak lengkap, faktor penyebab tersebut harus diperlakukan sebagai hipotesis, bukan hasil terkonfirmasi.

Pada BAC-50, satu spesimen hanya mencapai 4,89 MPa, sedangkan tiga spesimen lainnya mencapai 8,67–9,56 MPa. Pola ini menunjukkan adanya satu hasil rendah yang sangat memengaruhi rata-rata dan simpangan baku. Pemeriksaan ulang catatan pencampuran, cacat benda uji, posisi pada CTM, dan kalibrasi mesin diperlukan sebelum data digunakan untuk klaim kinerja material.

3.4 Hubungan densitas dan kuat tekan



Gambar 10. Hubungan deskriptif antara densitas dan kuat tekan seluruh benda uji.

Sumber: hasil pengolahan data penulis (2026).

Penjelasan teknis Gambar 10. Analisis menggunakan 16 pasangan data densitas-kuat tekan menghasilkan koefisien korelasi $r = 0,49$, koefisien determinasi $R^2 = 0,24$, dan $p = 0,054$. Nilai R^2 menunjukkan bahwa sekitar 24% variasi kuat tekan dapat diterangkan secara linear oleh densitas dalam kumpulan data ini, sedangkan sekitar 76% berkaitan dengan faktor lain atau variasi yang tidak tercatat. Karena p sedikit lebih besar dari 0,05 dan campuran serta umur berbeda, garis kecenderungan hanya digunakan sebagai deskripsi, bukan sebagai persamaan prediksi umum.

Analisis seluruh 16 benda uji menghasilkan korelasi positif sedang antara densitas dan kuat tekan ($r = 0.49$) dengan $R^2 = 0.24$. Artinya, sekitar 24,0% variasi kuat tekan dalam kumpulan data ini dapat dijelaskan secara linear oleh densitas, sedangkan sisanya terkait dengan faktor lain yang tidak tercatat. Nilai $p = 0.054$ berada sedikit di atas batas 0,05, sehingga hubungan tersebut belum cukup kuat untuk digeneralisasi. Hasil ini tetap sejalan secara arah dengan kajian beton berbuisa yang menunjukkan kecenderungan kuat tekan meningkat ketika densitas meningkat [4], [5], tetapi besarnya hubungan pada penelitian ini dipengaruhi heterogenitas campuran dan umur.



3.5 Evaluasi terhadap mutu rencana K-225

Nilai nominal K-225 setara dengan 225 kg/cm² atau sekitar 22,06 MPa pada sistem klasifikasi kubus. Rata-rata setiap kelompok hanya mencapai 25,9–36,8% dari nilai nominal tersebut. Oleh karena itu, istilah yang tepat adalah “beton rencana K-225” atau “campuran yang ditargetkan K-225”, bukan “beton mutu K-225” sebagai mutu yang telah tercapai. Dengan jumlah spesimen yang terbatas dan seluruh nilai rata-rata jauh di bawah target, tidak terdapat dasar untuk menyatakan salah satu kelompok memenuhi K-225.

Tabel 4. Evaluasi pencapaian terhadap nilai nominal K-225.

Kode	Rata-rata (kg/cm ²)	Nilai nominal K-225 (kg/cm ²)	Pencapaian (%)	Interpretasi
BRF-91	58,35	225	25,9	Belum mencapai nilai nominal K-225
BN-31	61,75	225	27,4	Belum mencapai nilai nominal K-225
BAC-50	82,71	225	36,8	Belum mencapai nilai nominal K-225
BSK-24	80,44	225	35,8	Belum mencapai nilai nominal K-225

Sumber: hasil pengolahan data penulis (2026).

Kegagalan mencapai target dapat disebabkan oleh satu atau beberapa faktor, seperti proporsi campuran yang tidak sesuai, faktor air-semen terlalu tinggi, kualitas agregat, penakaran manual, pemadatan tidak seragam, kehilangan pasta, curing tidak konsisten, atau prosedur pengujian, foam agent yang pecah tidak berkembang saat dicampurkan dengan mortar. Untuk memastikan penyebabnya, penelitian berikutnya harus menggunakan pengadukan mortar menggunakan mesin molen, foam agent yang baik dan berkualitas bagus, satu mix design kontrol yang terdokumentasi, variasi bahan yang mengubah hanya satu faktor pada satu waktu, umur uji yang sama (misalnya 7, 28, dan 56 hari untuk seluruh campuran), minimal tiga sampai lima spesimen per titik, serta pencatatan kuat tekan tanpa faktor konversi umur yang tidak dijelaskan.

3.6 Implikasi bahan tambah

Abu boiler tidak boleh secara otomatis disebut POFA tanpa bukti asal, preparasi, dan karakterisasi kimia. Kajian POFA menunjukkan bahwa kehalusan, kandungan silika reaktif, kadar karbon, dan persentase substitusi sangat menentukan kuat tekan [6]–[8]. Material memang berasal dari boiler pabrik kelapa sawit di Kabupaten Kuantan Singingi, penelitian lanjutan perlu melaporkan XRF, kehilangan pijar, ukuran partikel, proses pengeringan, penggilingan, dan persentase pengganti semen.

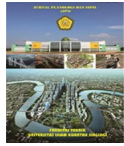
Pada beton berserat sabut kelapa, kadar dan panjang serat merupakan variabel kritis. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kadar optimum dapat memperbaiki beberapa sifat mekanik, tetapi peningkatan kadar yang berlebihan menurunkan workability dan dapat menurunkan kuat tekan akibat aglomerasi serta penyerapan air [9], [10]. Dengan demikian, hasil BSK-24 harus dipandang sebagai indikasi awal, bukan bukti efektivitas serat.

4. KESIMPULAN

1. Rekalkulasi terhadap 16 benda uji menghasilkan kuat tekan 2,67–10,00 MPa, dengan rata-rata kelompok 5,72–8,11 MPa dan densitas rata-rata 1.518,52–2.157,63 kg/m³.
2. Kelompok beton dengan abu cadas pada umur 50 hari memiliki rata-rata kuat tekan tertinggi sebesar 8,11 MPa, sedangkan beton ringan abu boiler dan foam agent umur 91 hari memiliki rata-rata terendah sebesar 5,72 MPa. Perbandingan ini bersifat deskriptif karena campuran dan umur tidak dikontrol secara seragam.
3. Seluruh kelompok hanya mencapai 25,9–36,8% dari nilai nominal K-225 (22,06 MPa), sehingga tidak dapat dikategorikan telah memenuhi mutu K-225.
4. Koefisien variasi 12,12–38,49% menunjukkan bahwa keseragaman benda uji masih menjadi masalah, terutama pada kelompok beton ringan, abu cadas, dan serat sabut kelapa.
5. Hubungan densitas dan kuat tekan bersifat positif sedang ($r = 0.49$; $R^2 = 0.24$), tetapi belum cukup kuat untuk menjadi model prediksi karena jumlah data kecil dan komposisi campuran heterogen.
6. Penelitian lanjutan perlu menggunakan mix design terdokumentasi, kontrol pada umur yang sama, dosis bahan tambah yang jelas, prosedur curing terstandar, mesin terkalibrasi, serta foto pola keruntuhan. Istilah POFA hanya digunakan setelah asal dan karakterisasi abu boiler terverifikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Kuantan Singingi atas dukungan fasilitas praktikum dan ketersediaan data pengujian laboratorium.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed. Harlow: Pearson Education, 2011.
- [2] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [3] Y. H. M. Amran, N. Farzadnia, and A. A. Abang Ali, "Properties and applications of foamed concrete; a review," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 990–1005, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112.
- [4] D. Falliano, D. De Domenico, G. Ricciardi, and E. Gugliandolo, "Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density," *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 735–749, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241.
- [5] R. Othman et al., "Relation between density and compressive strength of foamed concrete," *Materials*, vol. 14, no. 11, art. 2967, 2021, doi: 10.3390/ma14112967.
- [6] W. Sanawung, T. Cheewaket, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Influence of palm oil fuel ash and W/B ratios on compressive strength, water permeability, and chloride resistance of concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, art. 4927640, 2017, doi: 10.1155/2017/4927640.
- [7] N. M. S. Hasan et al., "Eco-friendly concrete incorporating palm oil fuel ash: Fresh and mechanical properties with machine learning prediction, and sustainability assessment," *Heliyon*, vol. 9, no. 11, art. e22296, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22296.
- [8] G. A. Akeke, P.-E. U. Inem, G. U. Alaneme, et al., "Experimental investigation and modelling of the mechanical properties of palm oil fuel ash concrete using Scheffe's method," *Scientific Reports*, vol. 13, art. 18583, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-45987-3.
- [9] N. G. Ozerkan, B. Ahsan, S. Mansour, and S. R. Iyengar, "Mechanical performance and durability of treated palm fiber reinforced mortars," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 2, no. 2, pp. 131–142, 2013/2014, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2014.04.002.
- [10] K. P. Guruswamy et al., "Coir fibre-reinforced concrete for enhanced compressive strength and sustainability in construction applications," *Heliyon*, vol. 10, no. 21, art. e39773, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39773.
- [11] Badan Standardisasi Nasional, SNI 03-1974-1990: Metode Pengujian Kuat Tekan Beton. Jakarta: BSN, 1990 (status: tidak berlaku).
- [12] Badan Standardisasi Nasional, SNI 1974:2023: Metode Uji untuk Kekuatan Tekan Spesimen Beton Silinder (ASTM C39/C39M-20, IDT). Jakarta: BSN, 2023.
- [13] F. Huang, D. Peng, Y. Zhao, G. Zhao, and S. Fu, "Effects of coconut shell ash and coir fiber on the mechanical properties and microstructure of concrete," *Buildings*, vol. 16, no. 5, art. 1063, 2026, doi: 10.3390/buildings16051063.