



Pengaruh Pemadatan dan Substitusi Bubur Kertas terhadap Kuat Tekan Batako Ringan Struktural Dinding

Muhammad Riswandy^{1*}, Alfisyahrin², Mhd. Arief Diana³, Michel Kasaf⁴, Ari Juanda⁵

^{1*,2,3,4,5}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Samudra, Kota Langsa, Indonesia

Email: ^{1*}riswandy@unsam.ac.id, ²alfisyahrin@unsam.ac.id, ³mhdariefdiana@unsam.ac.id, ⁴michelkasaf@unsam.ac.id, ⁵arijuanda@unsam.ac.id

Abstract

This study analyzes the impact of compaction levels and paper pulp ratios on the compressive strength of papercrete blocks. The objective is to develop a lightweight building material that meets structural strength standards based on SNI 03-0348-1989. The base formulation combines cement and sand in a 1:3 ratio, with the sand volume substituted by paper at variations of 80%, 90%, and 100%. Density engineering was conducted by compressing the initial mixture volumes of 120%, 130%, 140%, and 150% into a standard size of 5 cm x 10 cm x 20 cm. Mechanical performance testing involved single blocks, paired blocks bonded with a 1 cm mortar joint, and conventional red bricks as a control comparison. Experimental results demonstrate that most papercrete variants qualify as structural materials within classes II, III, and IV. Only the 120PB100 sample failed to meet the standard classification. Interestingly, the standard red brick did not qualify for any strength class under the SNI framework. The highest mechanical performance was achieved by the 140PB80 variant, yielding a single-block compressive strength of 70.139 kg/cm². However, when evaluated in a paired formation, the strength of this 140PB80 sample reduced by 29.87% to 49.190 kg/cm².

Keywords: Papercrete, Compressive Strength, Compaction Level, Sand Substitution, Structural Block.

Abstrak

Penelitian ini menganalisis dampak tingkat pemadatan dan rasio bubur kertas terhadap ketahanan tekan batako kertas. Tujuannya adalah menciptakan material bangunan yang berbobot ringan namun memenuhi standar kekuatan struktural menurut SNI 03-0348-1989. Formulasi dasar yang digunakan mengombinasikan semen dan pasir dengan perbandingan 1:3. Selanjutnya, volume pasir disubstitusi oleh kertas dengan variasi 80%, 90%, dan 100%. Rekayasa kepadatan dilakukan dengan mengompresi volume awal campuran sebesar 120%, 130%, 140%, dan 150% hingga padat menjadi ukuran standar 5 cm x 10 cm x 20 cm. Pengujian performa mekanis melibatkan sampel batako tunggal, batako berpasangan menggunakan perekat siar 1 cm, serta bata merah konvensional sebagai kontrol pembanding. Hasil eksperimen membuktikan bahwa mayoritas varian batako kertas layak dikategorikan sebagai material struktural kelas II, III, dan IV. Hanya sampel berkode 120PB100 yang tidak memenuhi klasifikasi standar. Unikinya, bata merah biasa justru tidak masuk dalam kategori kelas kuat SNI. Kinerja mekanis tertinggi ditemukan pada varian 140PB80 dengan kuat tekan batako tunggal mencapai 70,139 kg/cm². Kendati demikian, ketika diuji dalam formasi berpasangan, kekuatan sampel 140PB80 tersebut mengalami reduksi sebesar 29,87% menjadi 49,190 kg/cm².

Kata Kunci: Batako Kertas, Kuat Tekan, Tingkat Pemadatan, Substitusi Pasir, Batako Struktural.

1. PENDAHULUAN

Komponen pembentuk elemen dinding pada konstruksi rumah tinggal di Indonesia secara konvensional masih didominasi oleh batu bata merah dan batako. Hingga saat ini, pengaplikasian kedua material tersebut umumnya terbatas sebagai dinding pengisi (non-structural wall) (Setya et al., 2022; Pokharel et al., 2024; Bobanto et al., 2025). Kapasitas

kekuatan dinding konvensional ini hampir tidak pernah direncanakan secara matang, sehingga pola kerusakannya di lapangan menjadi di luar kontrol perencana struktur. Padahal, saat dihadapkan pada fenomena gempa bumi, material tersebut menunjukkan sifat getas (*brittle*) dan rentan runtuh secara mendadak yang membahayakan keselamatan penghuni (Demirel et al., 2025; Zain, 2026; Kativale et al., 2026). Di samping kelemahan struktural, proses produksi batu bata tanah liat bakar maupun batako semen-pasir memicu eksploitasi sumber daya alam secara masif. Aktivitas ini dalam jangka panjang mengancam keseimbangan lingkungan dan memicu kelangkaan material baku. Selain persoalan ekologis, batako dan batu bata memiliki densitas yang besar sehingga menambah beban mati total (*dead load*) struktur utama (Rentier & Cammeraat, 2022; Hussein et al., 2022). Oleh karena itu, diperlukan inovasi bahan bangunan baru yang mampu mereduksi bobot struktur sekaligus mengatasi kendala lingkungan tersebut.

Merespons kebutuhan ini, (Fasani et al., 2022) mengkaji pemanfaatan bata beton (*concrete block*) berbasis substitusi limbah murah yang bernilai ekonomi rendah namun memiliki karakteristik teknis yang mendukung. Salah satu aplikasinya adalah bata kertas (*paperbrick*), yaitu variasi bata ringan berupa komposit beton yang mengintegrasikan serat atau bubur kertas (*pulp*). Kendati demikian, pemanfaatan limbah kertas memiliki tantangan tersendiri. Cardinale et al., (2021) menunjukkan bahwa substitusi bubur kertas sebesar 50% menghasilkan kuat tekan di bawah beton normal. Penurunan ini dipicu oleh sifat hidrofilik serat kertas yang menyerap air tinggi, sehingga memperlemah ikatan antarmuka (*interfacial bond*) material dan menurunkan kemudahan pengerjaan (*workability*) (Sattarifard et al., 2022). Menghadapi kendala ini, Hamdouni et al., (2026) menegaskan bahwa penggunaan faktor air semen (FAS) yang rendah wajib diimbangi dengan metode pemadatan optimal untuk meminimalkan porositas beton. Berangkat dari permasalahan tersebut, penelitian ini menganalisis berat volume (densitas) bata kertas yang dipengaruhi oleh rekayasa proses pemadatan (*compression*).

Pemadatan dilakukan dengan mengompresi variasi volume campuran awal sebesar 120%, 130%, 140%, dan 150% hingga mencapai volume nominal standar 100%. Eksperimen ini menguji 252 spesimen bata kertas dengan kombinasi substitusi bubur kertas terhadap volume pasir sebesar 80%, 90%, dan 100% pada nilai FAS konstan 0,35. Seluruh spesimen dialokasikan untuk uji kuat tekan, densitas, dan absorpsi di Laboratorium Konstruksi dan Bahan Bangunan, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh. Pengujian kuat tekan dibagi menjadi dua metode: uji bata tunggal dan uji bata berpasangan (*masonry prism*) yang menggunakan dua potongan bata (5 cm x 10 cm x 10 cm) dan digabungkan dengan mortar pengikat/siar (1PC : 4Pasir) dengan tebal 10 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi pemadatan dan proporsi bubur kertas berpengaruh signifikan terhadap performa mekanis *paperbrick*. Kuat tekan maksimum bata tunggal mencapai 70,139 kg/cm² pada variasi kandungan kertas 80% dengan pemadatan 140%. Akibat pengaruh siar mortar, kuat tekan bata berpasangan jenis ini turun 29,87% menjadi 49,190 kg/cm².

Pola penurunan ini selaras dengan Sathiparan, (2026) mengenai korelasi kuat antara integritas ikatan mortar dan kapasitas tekan elemen dinding. Capaian mekanis *paperbrick* ini secara umum melampaui batu bata merah tunggal yang hanya mencatatkan kuat tekan 21,680 kg/cm², meskipun kuat tekan bata merah justru naik 36,49% (11,72 kg/cm²) dalam formasi berpasangan. Berdasarkan SNI 03-0348-1989, mayoritas variasi *paperbrick* memenuhi kualifikasi mutu bata beton Kelas II, III, dan IV (kecuali sampel 120PB80), sedangkan seluruh produk bata merah berkategori non-kelas. Dengan nilai densitas maksimum sebesar 1,237 gram/cm³, material ini resmi dikategorikan sebagai bata beton ringan struktural menurut standar ASTM C55-06

Perbedaan utama yang menjadi kebaruan (novelty) dalam penelitian ini dibandingkan penelitian papercrete terdahulu terletak pada metode rekayasa kepadatan melalui penambahan volume campuran awal (120%, 130%, 140%, dan 150%) yang dikompresi ke dalam cetakan nominal standar. Sementara penelitian sebelumnya umumnya hanya memvariasikan proporsi material aditif untuk menguji kuat tekan, penelitian ini secara spesifik mengintegrasikan efek pemadatan mekanis tersebut dengan variasi substitusi bubuk kertas tingkat tinggi (hingga 100%) untuk menghasilkan batako ringan yang memenuhi standar struktural SNI 03-0348-1989.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Desain Penelitian

Penelitian eksperimental ini diawali dengan tahapan studi literatur yang relevan, kemudian dilanjutkan dengan persiapan material pembentuk bata kertas, pemeriksaan sifat fisis agregat, perencanaan komposisi campuran (*mix design*), pembuatan benda uji, perawatan (*curing*), hingga pengujian laboratorium (Govindan and Kumarasamy, 2024). Alur pelaksanaan penelitian secara sistematis dirancang untuk mengetahui pengaruh tingkat densitas dan proporsi bubuk kertas terhadap kuat tekan mekanis komponen dinding.

2.2 Alat dan Bahan Penelitian

Eksperimen dan pengujian karakteristik mekanis spesimen dilakukan di Laboratorium Konstruksi dan Bahan Bangunan, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh. Instrumen pengujian utama yang digunakan adalah Universal Testing Machine (UTM) tipe Ton Industrie (kapasitas beban sesuai standar manufaktur Manhein, Jerman) untuk mengevaluasi kapasitas kuat tekan batako. Peralatan pendukung fungsional meliputi alat pengaduk mekanis (pulp maker) modifikasi, set saringan agregat standar, cetakan baja-kayu modular berdimensi nominal 5 cm × 10 cm × 20 cm, serta perangkat ukur presisi. Material utama yang digunakan dalam pembuatan komposit paperbrick meliputi:

1. Semen, semen Portland Tipe I produksi PT Lafayette Cement Indonesia yang memenuhi standar SNI 15-2049-1994.'
2. Agregat Halus, pasir alami lokal (lolos saringan 4,76 mm) yang bersumber dari Sungai Krueng Aceh.
3. Bubur Kertas, serat selulosa hasil daur ulang limbah kertas HVS bekas yang diproduksi secara mekanis hingga lolos saringan 4,76 mm.'
4. Air, air bersih standar PDAM Tirta Daroy yang memenuhi spesifikasi teknis bebas lumpur sesuai ASTM C 941-90.

2.3 Prosedur dan Tahapan Eksperimen

2.3.1 Pembuatan Bubur Kertas

Proses produksi bubuk kertas (pulp) diawali dengan merendam lembaran kertas HVS bekas di dalam air selama dua hari. Kertas yang telah melunak dihancurkan menggunakan mesin pengaduk mekanis, diremas, dan dikeringkan di dalam oven. Sebelum dicampur ke dalam matriks beton, bubuk kertas kering ditambahkan air kembali hingga mencapai tingkat kandungan air konstan sebesar 45% (rasio 2,14 ml/gr) guna mencegah penyerapan air faktor air semen (FAS) selama proses hidrasi semen berlangsung

2.3.2 Pemeriksaan Karakteristik Agregat

Pemeriksaan sifat fisis komponen agregat halus dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM, yang meliputi parameter berat jenis (ASTM C.127-93), absorpsi (ASTM C.128-93), berat volume (ASTM C.127-93), analisis saringan (ASTM C.136-93), serta pengujian kandungan zat organik menggunakan metode larutan NaOH 3% (Abram's Harder).

2.3.3 Perencanaan Campuran (Mix Design) dan Pematatan

Proporsi adukan dirancang menggunakan metode coba-coba (trial) dengan perbandingan volume Semen : Agregat = 1 : 3. Unsur agregat merupakan kombinasi dari pasir dan substitusi bubuk kertas dengan variasi rasio 80%, 90%, dan 100% pada nilai FAS tetap 0,35. Rekayasa densitas diaplikasikan melalui 4 variasi pematatan mekanis (compression), yaitu memadatkan volume adukan aditif sebesar 120%, 130%, 140%, dan 150% hingga mencapai volume nominal cetakan 100%. Rincian kebutuhan material disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Proporsi Campuran Untuk 1 m³ Bata Kertas

Mix Design	Substitusi Volume Bubur Kertas terhadap Volume Pasir %	Material				
		Air (liter)		Semen (kg)	Pasir (kg)	Bubur Kertas (kg)
		FA S	Bubur Kertas			
PB80	80	(0,35) 145	(45%) 327	(25%) 414	(15%) 283	(60%) 153
PB90	90	(0,35) 145	(45%) 368	(25%) 414	(7,5%) 142	(67,5%) 172
PB90	100	(0,35) 145	(45%) 409	(25%) 414	(0%) 0	(75%) 191

Keterangan:

- PB80 = Bata kertas dengan persentase substitusi volume bubuk kertas terhadap volume total pasir yang dibutuhkan sebesar 80%.
- PB90 = Bata kertas dengan persentase substitusi volume bubuk kertas terhadap volume total pasir yang dibutuhkan sebesar 90%.
- PB100 = Bata kertas dengan persentase substitusi volume bubuk kertas terhadap volume total pasir yang dibutuhkan sebesar 100%.

2.3.4 Pembuatan dan Pengujian Spesimen

Total spesimen yang diproduksi adalah sebanyak 252 unit bata kertas. Setelah melewati masa perawatan (*curing*) basah, seluruh sampel diuji pada umur 28 hari untuk mengukur nilai densitas, absorpsi, serta kuat tekan. Pengujian kapasitas tekan dilakukan melalui dua skenario pengujian:

1. Kuat Tekan Tunggal: Memberikan beban tekan aksial searah langsung pada unit utuh berukuran 5 cm x 10 cm x 20 cm.
2. Kuat Tekan Berpasangan (*Masonry Prism*): Menguji dua unit potongan bata 5 cm x 10 cm x 10 cm yang direkatkan secara vertikal menggunakan mortar siar campuran 1 PC : 4 Pasir dengan ketebalan siar dibatasi sebesar 10 mm.

2.4 Analisis Data

Seluruh data kuantitatif berupa nilai kuat tekan, berat volume, dan kapasitas absorpsi dihitung menggunakan analisis nilai rata-rata sampel. Tingkat keragaman dan kerataan persebaran data hasil uji laboratorium dievaluasi dengan menghitung nilai koefisien ragam sampel. Analisis statistik varians (ANOVA) diterapkan untuk mengidentifikasi signifikansi pengaruh variasi pemadatan dan persentase bubuk kertas terhadap sifat mekanis komponen (Hair *et al.*, 2019). Formulasi hubungan antarvariabel dianalisis menggunakan pemodelan regresi bantuan perangkat lunak komputer untuk menentukan nilai koefisien determinasi (R²) tertinggi (Hair *et al.*, 2019).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemeriksaan Sifat Fisis Agregat dan Proporsi Campuran

Pemeriksaan sifat fisis agregat meliputi pemeriksaan berat volume, susunan butiran, berat jenis, dan absorpsi. Hasil pemeriksaan dibandingkan dengan persyaratan dan teori-teori dari literatur, sehingga dapat ditentukan apakah mutu agregat tersebut memenuhi syarat sebagai bahan pembentuk beton dan untuk perencanaan komposisi campuran beton. Hasil pemeriksaan sifat fisis pasir dapat dilihat pada Tabel 2. Pengukuran dan perhitungan berat jenis, absorpsi, berat volume, dan fineness modulus pasir.

Tabel 2. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisis Pasir

Pemeriksaan Material	Hasil Penelitian
- Berat jenis kering oven	2,549
- Berat jenis kering permukaan	2,670
- Absorpsi	4,741%
- Berat Volume	1,076 kg/l
- Fineness Modulus	3,375

Hasil pemeriksaan sifat fisis bubuk kertas dapat dilihat pada Tabel 3. Pengukuran dan perhitungan berat jenis, absorpsi, berat volume, dan fineness modulus bubuk kertas.

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Sifat Fisis Bubuk Kertas

Pemeriksaan Material	Hasil Penelitian
- Berat jenis kering oven	1,193 gr/ml
- Berat jenis kering permukaan	2,670
- Berat Volume	0,226
- Fineness Modulus	5,669

3.2 Hasil Pengecoran Bata Kertas

Setelah semua material pembentuk tercampur merata, maka mortar bata kertas segar siap untuk langsung dicetak. Berat mortar segar yang dimasukkan ke dalam tiap cetakan bata kertas sesuai proporsi campuran rencana dan pemadatannya yang dapat dilihat pada Tabel 4. Setelah mortar bata kertas dimasukkan dalam cetakan, lalu dilakukan proses pemadatan hingga bata kertas mencapai ukuran 5 cm x 10 cm x 20 cm.

Tabel 4. Berat Mortar Segar yang Dimasukkan ke Dalam Cetakan

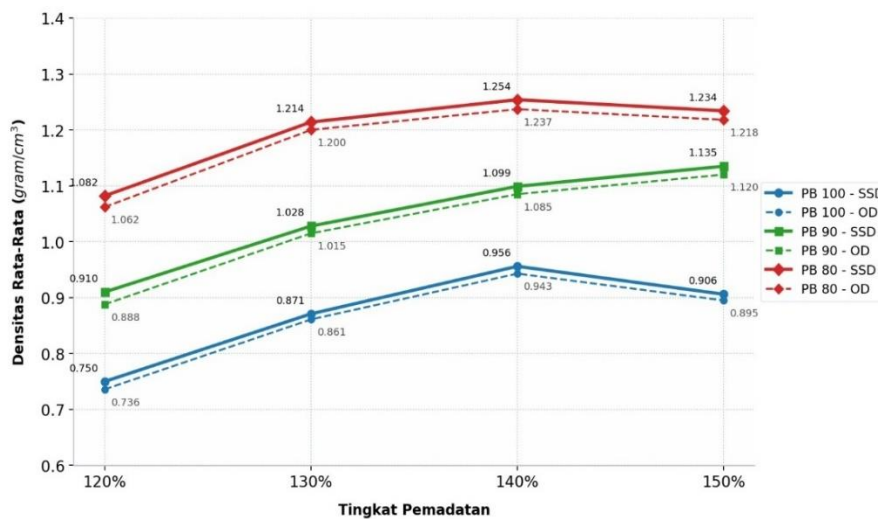
Kode Bata	Berat Mortar Segar Tiap Cetakan (kg)
120PB80	1,59
130PB80	1,72
140PB80	1,85
150PB80	1,98

Kode Bata	Berat Mortar Segar Tiap Cetakan (kg)
120PB90	1,49
130PB90	1,61
140PB90	1,74
150PB90	1,86
120PB100	1,39
130PB100	1,51
140PB100	1,62
150PB100	1,74

Setelah berumur 7 hari, benda uji dirapikan pada setiap sisi dan sudutnya. Kemudian bata kertas dikelompokkan sesuai kode varian dan kelompok uji yaitu pengujian densitas, absorpsi serta pengujian kuat bata kertas tunggal dan berpasangan. Sebelum dilakukan pengujian benda uji pada umur 28 hari, benda uji tersebut diukur dan ditimbang terlebih dahulu. Hasil pengukuran benda uji menunjukkan bahwa ada beberapa jenis bata kertas yang ukurannya melebihi batas yang ditoleransikan oleh SNI 03-0348-1989.

3.3 Hasil Pengujian Densitas

Pengujian densitas dilakukan pada benda uji berupa bata kertas dengan ukuran 5 cm x 10 cm x 20 cm, pada saat beton berumur 28 hari. Hasil pengujian densitas dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Grafik 1. Hasil Pengujian Densitas Bata Kertas

Berdasarkan gambar menunjukkan bahwa semakin besar pematatan yang diberikan maka semakin tinggi nilai densitasnya. Pematatan tersebut diperoleh dengan menambahkan volume dari 100% volume yang diperlukan. Namun, dari grafik juga terlihat penurunan nilai densitas yaitu pada pematatan 150% volume. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, hal tersebut terjadi karena adanya pengembangan kembali dari bata kertas pada varian tersebut. Besarnya densitas yang terbentuk dari pematatan sangat dipengaruhi oleh keakuratan penimbangan mortar pada cetakan tiap bata

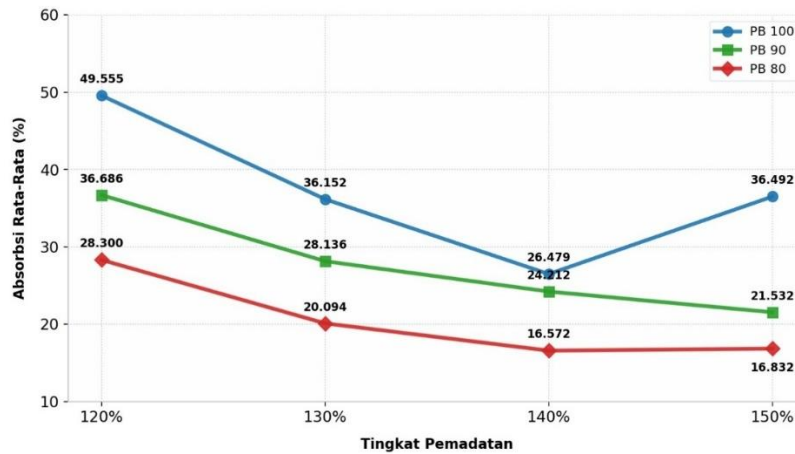
Data pembandingan pengujian densitas diambil dari bata merah yang mewakili bata rakyat. Dengan metode yang sama, maka didapatlah hasil pengujian densitas bata merah pada Gambar 2 berikut.



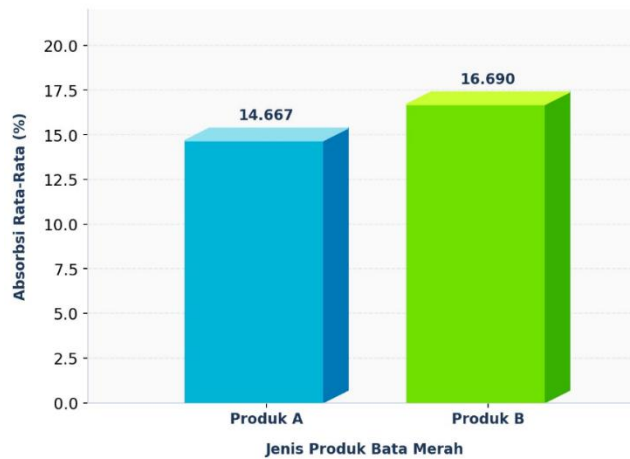
Grafik 2. Hasil Pengujian Densitas Bata Merah

3.4 Hasil Pengujian Penyerapan Air (Absorpsi) Bata Kertas

Pengujian penyerapan air (absorpsi) dilakukan pada benda uji bata kertas, pada saat benda uji berumur 28 hari. Pengujian juga dilakukan pada bata merah (bata rakyat) sebagai pembandingan. Hasil pengujian absorpsi bata kertas dapat dilihat pada gambar 3 berikut. Sedangkan hasil pengujian absorpsi bata merah dapat dilihat pada gambar 4.



Grafik 3. Hasil Pengujian Absorpsi Bata Kertas



Grafik 4. Hasil Pengujian Absorpsi Bata Merah

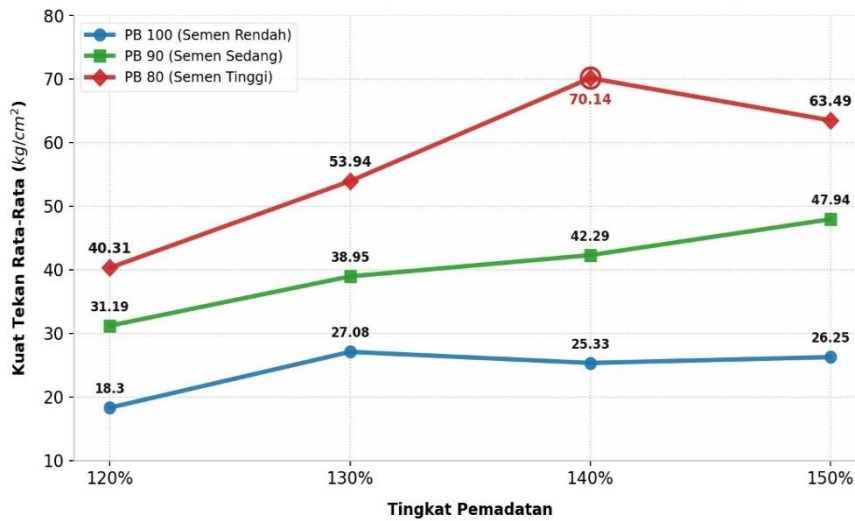
3.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada saat benda uji berumur 28 hari yang terdiri dari 3 (tiga) pengujian yaitu:

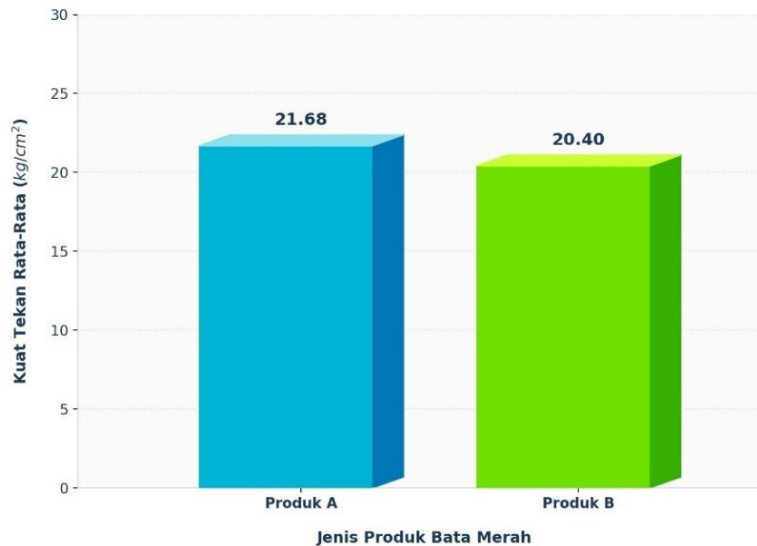
- pengujian kuat tekan bata tunggal;
- pengujian kuat tekan bata berpasangan; dan
- pengujian kuat tekan beton kontrol siar pada bata berpasangan.

3.5.1 Hasil pengujian kuat tekan bata Tunggal

Pengujian kuat tekan bata tunggal terdiri atas bata kertas tunggal dan bata merah tunggal. Secara ringkas, hasil pengujian kuat tekan rata-rata disajikan dalam gambar 5 dan gambar 6 berikut.



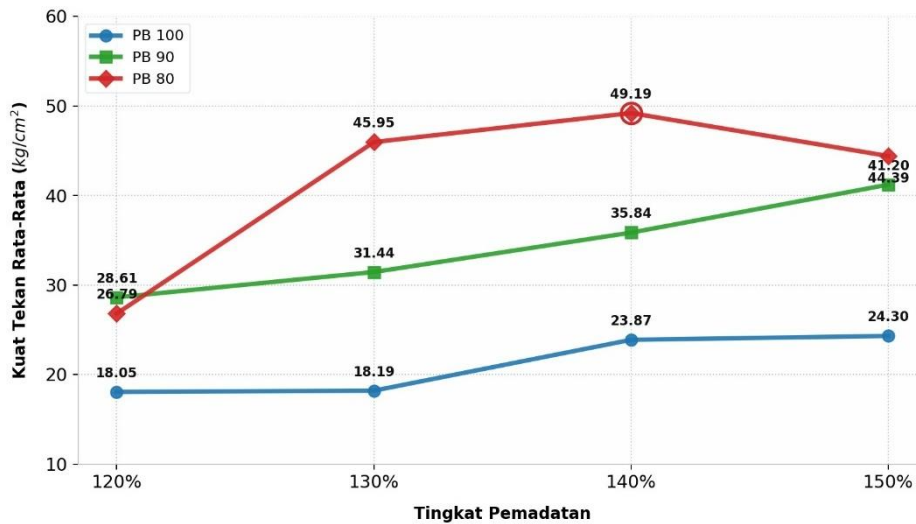
Grafik 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Bata Kertas Tunggal



Grafik 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Bata Merah Tunggal

3.5.2 Hasil pengujian kuat tekan bata berpasangan

Pengujian kuat tekan bata berpasangan terdiri atas bata kertas berpasangan dan bata merah berpasangan. Hasil pengujian secara ringkas disajikan dalam gambar 7 dan gambar 8 berikut.



Grafik 7. Hasil Pengujian Kuat Tekan Bata Kertas Berpasangan



Grafik 8. Hasil Pengujian Kuat Tekan Bata Merah Berpasangan

Sebagai kontrol kekuatan siar bata berpasangan, maka dilakukan juga uji tekan beton kontrol mortar pembentuk siar. Hasil pengujian beton kontrol tersebut disajikan dalam Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Kontrol Siar

Kode BU	Beban (P)	Kuat Tekan σ
	(kg)	(kg/cm ²)
1	1300	50,88
2	1305	50,87
3	1385	54,53
4	1305	49,88
5	1240	48,43
6	1400	54,57

3.6 Analisis Data

Hasil pengujian kuat tekan bata tunggal dan berpasangan dilakukan seleksi data secara statistik. Hal ini dimaksudkan untuk melihat mutu pelaksanaan di laboratorium terutama pada saat penimbangan mortar dalam tiap cetakan. Sebab keakuratan dalam penimbangan sangat mempengaruhi besarnya kepadatan yang dihasilkan dari kelebihan volume.

3.6.1 Analisis varian

Analisis varian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi densitas dan proporsi bubuk kertas terhadap kuat tekan bata kertas. Analisis ini hanya dilakukan terhadap bata kertas tunggal. Sebab bata kertas tunggal merupakan unit yang utuh dan belum dipengaruhi oleh siar. Adapun hasil perhitungan analisis varian secara ringkas disajikan dalam Tabel 6.

Dari hasil perhitungan analisis varian tersebut, diperoleh nilai F_0 hitung lebih besar dari F_0 tabel. Hal ini menunjukkan bahwa variasi densitas dan proporsi bubuk kertas berpengaruh terhadap kuat tekan bata kertas sehingga dapat dilakukan analisis regresi.

Tabel 6. Analisis Varian Pengaruh Variasi Pemasatan dan Proporsi Bubur Kertas Terhadap Kuat Tekan Bata Kertas

Sumber Variasi	Jumlah Kuadrat	Derajat Kebebasan	Rata-rata Kuadrat	F_0 Hitung	F_0 Tabel
Pemasatan	3348,893	3	1116,298	103,736	2,75
% Bubur Kertas	13500,383	2	6750,192	627,288	3,14
Interaksi	1175,392	6	195,899	18,205	2,24
Error	688,698	64	10,761		
Total	18713,366	75			

3.6.2 Analisis regresi

Pada analisis regresi data kuat tekan bata kertas dipilih sebagai variabel terikat (*dependent variable*). Sedangkan variasi pemasatan dan proporsi bubuk kertas sebagai variabel bebas (*independent variable*). Analisis regresi yang dipakai adalah analisis regresi linear berganda dan regresi polinomial berganda. Tujuan dari penyajian kedua model regresi tersebut adalah untuk melihat jenis regresi mana yang paling cocok untuk digunakan dalam penelitian ini. Secara ringkas, hasil perhitungan analisis regresi diperoleh persamaan sebagai berikut:

- a. Regresi linear berganda untuk kuat tekan bata kertas tunggal

$$Y = 118,263 + 0,530X_1 - 1,643X_2$$

$$R^2 = 0,864$$

- b. Regresi Polinomial Berganda untuk kuat tekan bata kertas tunggal

$$Y = -736,908 + 10,605X_1 + 2,324X_2 - 0,028 X_1^2 + 0X_2^2 - 0,029X_1X_2$$

$$Y = -736,908 + 10,605X_1 + 2,324X_2 - 0,028 X_1^2 - 0,029X_1X_2$$

$$R^2 = 0,922$$

- c. Regresi linear berganda untuk kuat tekan bata kertas berpasangan

$$Y = 80,030 + 0,350X_1 - 1,048X_2$$

$$R^2 = 0,784$$

- d. Regresi polinomial berganda untuk kuat tekan bata kertas berpasangan

$$Y = -636,348 + 4,962X_1 + 8,030X_2 - 0,013X_1^2 - 0,041X_2^2 - 0,013X_1X_2$$

$$R^2 = 0,843$$

Keterangan:

$$Y = \text{Kuat tekan bata kertas (kg/cm}^2\text{)}$$

$$X_1 = \text{Jumlah variasi pemasatan (120\%, 130\%, 140\% dan 150\% volume)}$$

$$X_2 = \text{Jumlah variasi proporsi bubuk kertas (80\%, 90\% dan 100\%)}$$

3.6.3 Analisis varian pengujian nyata regresi

Tujuan dari dilakukannya analisis varian uji nyata regresi ini adalah untuk mengetahui kesesuaian model regresi. Data yang digunakan adalah variasi pemasatan,

proporsi bubuk kertas dan kuat tekan bata kertas. Hasil analisis varian uji nyata regresi menunjukkan kurva yang paling sesuai adalah persamaan polinomial berganda. Hal ini ditentukan dengan nilai *R-square* tertinggi. Secara ringkas, hasil perhitungan analisis varian uji nyata regresi untuk persamaan linear berganda dan polinomial berganda disajikan dalam Tabel 7 dan Tabel 8 berikut.

Tabel 7. Hasil Analisis Varian Uji Nyata Regresi Linear Berganda Bata Kertas Tunggal

Sumber Variasi	Jumlah Kuadrat	Derajat Kebebasan	Rata-Rata Kuadrat	F _o	F _o Tabel	R ²
Regresi	17259,015	2	8629,508	433,151	3,13	0,922
Error	1454,351	73	19,923			
Total	18713,366	75				

Tabel 8. Hasil Analisis Varian Uji Nyata Regresi Linear Berganda Kuat Tekan Bata Kertas Berpasangan

Sumber Variasi	Jumlah Kuadrat	Derajat Kebebasan	Rata-Rata Kuadrat	F _o	F _o Tabel	R ²
Regresi	8325,353	2	4162,676	225,775	3,12	0,843
Error	1548,732	84	18,437			
Total	9874,085	86				

Berdasarkan Tabel 15 dan Tabel 16 tersebut, maka hasil analisis varian uji nyata regresi menunjukkan bahwa F_0 hitung lebih besar dari F_0 tabel. Hal ini menunjukkan bahwa regresi linear berganda dan polinomial berganda sesuai untuk analisis data.

3.7 Pembahasan

Hasil dari kegiatan pengecoran bahan material dan pembuatan bata kertas menunjukkan bahwa pelaksanaan memiliki tingkat workabilitas yang rendah. Hal ini dikarenakan nilai FAS yang digunakan sangat kecil dan dihindarinya keluarnya air pada saat proses pemadatan. Selain itu, semakin besar kelebihan volume yang diberikan maka semakin sulit pula proses pemadatan yang dilakukan. Berdasarkan pengamatan visual yang dilakukan setelah bata kertas berumur 7 (tujuh) hari menunjukkan bahwa bata kertas yang mengandung pasir memiliki tekstur permukaan yang lebih halus dari pada bata kertas yang tidak mengandung pasir. Hal ini disebabkan oleh pasir yang mampu mengisi rongga pori antar kertas (Amin *et al.*, 2023).

Pengamatan visual lain juga menunjukkan adanya pengembangan volume bata kertas yaitu 150PB100 dan 150PB80. Pada bata kertas 150PB100 hal ini terjadi karena kelebihan volume yang diberikan sebesar 50% dari 100% volume tidak mampu lagi dipadatkan menjadi bata berukuran 5 cm x 10 cm x 20 cm. Bata kertas 150PB100 juga terdiri dari 100% proporsi bubuk kertas (pasir = 0%) sehingga sangat memungkinkan semen sudah tidak mampu lagi mengikat kertas yang bersifat mengembang kembali ketika dipadatkan. Jumlah pasir 0% juga membuat pengembangan semakin besar sebab tidak adanya pengisi rongga antar kertas pada saat terjadi pengembangan Kembali (Mármol and Savastano jr, 2022).

Hal serupa juga terjadi pada bata kertas 150PB80. Akan tetapi pengembangan volume yang terjadi lebih disebabkan karena pasir pengisi rongga antar kertas sudah berlebih. Sehingga komposisi pasir sebesar 20% dari total pasir yang diperlukan sudah tidak mampu lagi dipadatkan. Namun, pengembangan kembali tidak terjadi pada bata 150PB90. Proporsi kertas 90% mampu terpadatkan dengan baik dan komposisi pasir 10% mampu mengisi rongga antar kertas dan tidak mengganggu pemadatan.

Berdasarkan analisis varian menunjukkan adanya pengaruh variasi pemadatan dan proporsi bubuk kertas terhadap kuat tekan bata kertas. Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai F_0 hitung lebih besar dari pada F_0 tabel. Interaksi antara pemadatan dan proporsi bubuk

kertas memberikan nilai F_0 hitung sebesar 18,205 sedangkan F_0 tabel sebesar 2,24. Grafik hubungan antara variasi pemadatan dan proporsi bubur kertas terhadap kuat tekan bata kertas. Berdasarkan nilai koefisien determinasinya (R^2), maka analisis regresi yang sesuai untuk penelitian ini adalah regresi polinomial berganda. Nilai R^2 pada regresi polinomial berganda lebih besar dari pada nilai R^2 pada regresi linear berganda yaitu ($0,922 > 0,864$) untuk bata kertas tunggal dan ($0,843 > 0,784$) untuk bata kertas berpasangan. Semakin besar kepadatan yang dihasilkan maka semakin tinggi pula nilai kuat tekannya. Akan tetapi hal ini tidak berlaku untuk pemadatan 150% volume pada PB100 dan PB80. Hal ini disebabkan karena berkurangnya nilai kepadatan akibat pengembangan kembali yang terjadi seperti yang dijelaskan pada paragraf 1,2 dan 3. Oleh karena itu, PB90 merupakan komposisi optimum untuk mendapatkan kepadatan yang baik. Selain itu, gambar di atas juga memperlihatkan kurva PB80 dimana persentase substitusi volume kertas terhadap volume pasir total sebesar 80% berada di posisi paling atas. Hal tersebut berarti bahwa proporsi kertas berbanding terbalik dengan kuat tekan bata kertas. Semakin besar proporsi bubur kertas maka kuat tekan bata kertas akan semakin kecil.

Berdasarkan nilai rata-rata kuat tekan tersebut, maka bata kertas ini dapat digolongkan berdasarkan mutu kelas kuatnya menurut SNI 03-0348-1989. Berdasarkan pengujian bata kertas pasangan diperoleh hasil yang berbeda dengan nilai kuat tekan bata kertas tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan siar bata berpengaruh terhadap kuat tekan bata itu sendiri. Pada bata kertas, kuat tekan bata kertas tunggal lebih besar dari pada kuat tekan bata kertas berpasangan. Kekuatan siar yang berada di bawah kuat tekan bata tunggal akan menurunkan nilai kuat tekan bata kertas itu sendiri. Hal ini didukung oleh pengamatan visual saat pengujian, di mana retak dan kerusakan awal pada spesimen berpasangan selalu diinisiasi dari komponen siar mortar. Fenomena penurunan kapasitas mekanis akibat keberadaan siar ini selaras dengan temuan Sathiparan, (2026) mengenai korelasi kuat antara integritas ikatan mortar dan kapasitas tekan elemen dinding. Selain itu, Pokharel *et al.*, (2024) juga mengonfirmasi bahwa perbedaan modulus elastisitas antara unit penyusun dan mortar pengikat sering kali memicu konsentrasi tegangan yang menginisiasi retak awal pada sambungan siar sebelum unit bata mencapai kuat tekan maksimumnya. Akan tetapi berbeda dengan bata merah, adanya siar justru dapat menaikkan kuat tekan bata tersebut. Itu disebabkan karena nilai kuat tekan bata merah tunggal di bawah nilai kuat tekan siar, adanya siar justru dapat menaikkan kuat tekan bata tersebut. Itu disebabkan karena nilai kuat tekan bata merah tunggal di bawah nilai kuat tekan siar. Berdasarkan hasil pengamatan langsung pada saat uji tekan dilakukan, kerusakan awal akibat beban tekan bata merah pasangan bermula dari bata merah itu sendiri.

Dari berbagai kondisi yang ada, maka terlihat bahwa penggunaan bubur kertas tidak mampu memberikan nilai tambah bagi kuat tekan bata kertas. Akan tetapi tanpa kertas pun bukan berarti baik bagi bata kertas sebab akan berpengaruh pada nilai beratnya sehingga membuat bata kertas menjadi tidak tepat guna. Sedangkan densitas yang diperbesar melalui proses pemadatan dapat meningkatkan nilai kuat tekan bata kertas. Maksimum nilai pemadatan ialah 140%, sebab pada nilai 150% volume akan terjadi pengembangan kembali setelah dipadatkan.

Nilai maksimum kuat tekan bata kertas tunggal ialah 70,139 kg/cm² (140PB980) sedangkan nilai minimumnya ialah 18,301 kg/cm² (120PB100). Sedangkan nilai kuat tekan bata kertas berpasangan maksimum sebesar 49,190 kg/cm² (140PB80) sedangkan nilai minimumnya 18,048 kg/cm² (120PB100). Nilai maksimum penurunan kuat tekan dari bata kertas tunggal ke bata kertas berpasangan sebesar 19,10 kg/cm² atau 30,08% pada bata 150PB80. Sedangkan nilai minimum penurunannya sebesar 0,25 kg/cm² atau

1,38% pada bata 120PB100. Untuk mengatasi penurunan nilai kuat ini dapat dilakukan salah satunya dengan meningkatkan kekuatan siar itu sendiri.

Nilai maksimum kuat tekan bata merah tunggal ialah 21,680 kg/cm² (bata merah A) sedangkan nilai kuat tekan bata merah B ialah 20,399 kg/cm². Sedangkan nilai kuat tekan bata merah berpasangan maksimum sebesar 32,118 kg/cm² (bata merah B) sedangkan nilai kuat tekan bata merah berpasangan jenis A sebesar 24,437 kg/cm². Nilai maksimum penambahan kuat tekan dari bata merah tunggal ke bata merah berpasangan sebesar 11,719 kg/cm² atau 36,49% pada bata merah B. Selain pengujian kuat tekan, penelitian ini juga meninjau densitas dan absorpsi bata kertas itu sendiri. Tujuannya adalah melihat variasi bata yang mampu memberikan nilai kuat tekan yang berstandar namun memiliki nilai berat volume (densitas) yang kecil/ringan. Hasil penelitian menunjukkan hubungan antara pemadatan dengan besarnya densitas. Berdasarkan hasil menunjukkan bahwa semakin besar pemadatan yang diberikan maka semakin tinggi nilai densitasnya. Pemadatan tersebut diperoleh dengan menambahkan volume dari 100% volume yang diperlukan. Namun, dari grafik juga terlihat penurunan nilai densitas yaitu pada pemadatan 150% volume. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, hal tersebut terjadi karena adanya pengembangan kembali dari bata kertas pada varian tersebut. Besarnya densitas yang terbentuk dari pemadatan sangat dipengaruhi oleh keakuratan penimbangan mortar pada cetakan tiap bata.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi pemadatan dan proporsi bubuk kertas memegang peranan yang sangat signifikan dalam menentukan karakteristik mekanis serta fisik dari bata kertas yang dihasilkan. Hasil analisis varian menunjukkan adanya pola hubungan yang jelas; di satu sisi, peningkatan proporsi bubuk kertas justru memicu penurunan nilai kuat tekan karena kerapatan struktural material yang berkurang. Di sisi lain, intervensi berupa peningkatan intensitas pemadatan terbukti secara efektif mampu meningkatkan densitas antar-partikel, sehingga nilai kuat tekan bata kertas meningkat secara linier. Puncak dari kombinasi perlakuan ini menghasilkan capaian optimal pada varian 140PB80, yang sukses membukukan nilai kuat tekan bata tunggal maksimum sebesar 70,139 kg/cm². Kendati demikian, ketika diintegrasikan ke dalam pengujian struktural berskala bata berpasangan, kemampuan akomodasi bebannya mengalami reduksi mekanis dengan penurunan maksimum mencapai 29,87%, sehingga kekuatannya terkoreksi menjadi 49,190 kg/cm² pada varian yang sama.

Sementara itu, ditinjau dari aspek karakteristik fisik dan bobot material, bata kertas ini menunjukkan performa yang sangat potensial dengan perolehan nilai densitas maksimum sebesar 1,237 gram/cm³. Berdasarkan acuan standar internasional ASTM C55-06, spesifikasi massa jenis tersebut secara resmi menggolongkan material inovatif ini ke dalam kategori bata ringan, yang sangat ideal untuk mereduksi beban mati pada struktur bangunan. Terakhir, jika ditinjau dari standarisasi mutu nasional berdasarkan SNI 03-0348-1989, produk bata kertas yang dikembangkan dalam riset ini secara umum memiliki kualitas yang kompetitif dan layak diaplikasikan. Hal ini dibuktikan oleh kemampuan hampir seluruh varian sampel yang berhasil menembus klasifikasi kelas kuat II, III, dan IV, dengan satu-satunya pengecualian mutlak terjadi pada varian bata 120PB80 yang performanya masih berada di bawah standar minimum sehingga dikategorikan sebagai non-kelas.

REFERENCES

- Amin, M. *et al.* (2023) "Investigation of the Physical Mechanical Properties and Durability of Sustainable Ultra-High Performance Concrete with Recycled Waste Glass," *Sustainability*, 15(4), p. 3085. Available at: <https://doi.org/10.3390/su15043085>.
- Bobanto, M.D. *et al.* (2025) "Incorporation of Lokon Ash, Plastic and Fish Scales Waste in Concrete Composites and Their Compressive Strength," *Jurnal Ilmiah Sains*, pp. 138–149. Available at: <https://doi.org/10.35799/jis.v25i2.59325>.
- Cardinale, T. *et al.* (2021) "Mechanical and Physical Characterization of Papercrete as New Eco-Friendly Construction Material," *Applied Sciences*, 11(3), p. 1011. Available at: <https://doi.org/10.3390/app11031011>.
- Demirel, İ.O. *et al.* (2025) "Seismic Enhancement of Masonry-Infilled Substandard Reinforced Concrete Frames Using Lightweight Steel Exoskeleton," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 55(3), pp. 603–623. Available at: <https://doi.org/10.1002/eqe.70102>.
- Fasani, A.Z. *et al.* (2022) "Pemanfaatan Agregat Plastik pada Pembuatan Bata Beton," *Rekayasa Sipil*, 16(2), pp. 82–86. Available at: <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2022.016.02.2>.
- Govindan, B. and Kumarasamy, V. (2024) "Sustainable valorization through the reuse of incinerated paper mill sludge ash in building brick production," *Construction and Building Materials*, 439, p. 137291. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137291>.
- Hair, J.J.F. *et al.* (2019) "Multivariate Data Analysis." Cengage Learning, p. 832.
- Hamdouni, S. *et al.* (2026) "Study of the properties of self-compacting concrete incorporating various cementitious powder components using response surface methodology and optimization technique," *Results in Engineering*, 30, p. 111100. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.111100>.
- Hussein, Y.M. *et al.* (2022) "Development and performance of sustainable structural lightweight concrete containing waste clay bricks," *Journal of Materials Research and Technology*, 21, pp. 4344–4359. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.042>.
- Kativale, D., Kurlapkar, R. and Shendkar, M.R. (2026) "A comprehensive review on the influence of masonry infill wall properties and opening configurations on the seismic response of RC buildings," *E3S Web of Conferences*, 702, p. 06007. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202670206007>.
- Mármol, G. and Savastano jr, H. (2022) "High-toughness M-S-H cement composites reinforced with cellulose fibers through CO₂ curing," *Cement and Concrete Composites*, 134, p. 104759. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104759>.
- Pokharel, S. *et al.* (2024) "Seismic Performance of Masonry-Infilled RC Frames and Its Implications in Design Approach: A Review," *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 29(2). Available at: <https://doi.org/10.1061/ppscfx.sceng-1337>.
- Rentier, E.S. and Cammeraat, L.H. (2022) "The environmental impacts of river sand mining," *Science of the Total Environment*, 838, p. 155877. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155877>.
- Sathiparan, N. (2026) "Machine learning-based prediction of cement mortar compressive strength: influence of mix proportions and aggregate characteristics," *Discover Civil Engineering*, 3(1), p. 95. Available at: <https://doi.org/10.1007/s44290-026-00487-x>.
- Sattarifard, Ahmad Reza *et al.* (2022) "Fresh and hardened-state properties of hybrid fiber-reinforced high-strength self-compacting cementitious composites," *Construction and Building Materials*, 318, p. 125874. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125874>.

Setya, H. *et al.* (2022) “UJI KUAT TEKAN PASANGAN BATAKO DENGAN MENGGUNAKAN MORTAR PASIR KALI WAE ARA MANGGARAI NTT,” *Jurnal Qua Teknika*, 12(2), pp. 72–78. Available at: <https://doi.org/10.35457/quateknika.v12i2.2368>.

Zain, A.M. (2026) “Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Rangka Beton Pemikul Momen dengan Pengaruh Dinding Pengisi Menggunakan SNI 9273 : 2025 (Studi Kasus : Wilayah Gempa Kota Palu),” *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), pp. 36–43.