Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 14, No. 5, September 2025, hal. 444 – 458
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.14.5.444-458.2025

Open Access

Studi Eksperimental dan Analisis Statistik Multifaktorial terhadap Pengaruh Komposisi Limbah Plastik, Limbah Serabut Kelapa, *Fly Ash*, dan Gipsum sebagai Bahan Substitusi dalam Pembuatan Papan Semen Ramah Lingkungan

Yessie Ardina Kusuma[1*], Ridho Akbar[2]
[1]Depertemen Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surabaya
[2]Depertemen Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Surabaya

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 3 Juni 2025
Direvisi: 2 Agustus 2025
Diterima: 29 Agustus 2025

Kata kunci:
ANOVA
Papan Semen
Ramah Lingkungan
SNI 03-2105-2006
Tukey HSD

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan papan semen ramah lingkungan melalui pemanfaatan limbah polipropilena (PP), serabut kelapa, *fly ash*, dan gipsum. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh variasi komposisi bahan terhadap karakteristik fisis-mekanik berdasarkan standar SNI 03-2105-2006 serta menentukan formulasi optimal melalui pendekatan statistik multifaktorial. Metode penelitian menggunakan desain faktorial 5×3 dengan dua faktor utama: rasio PP-serabut kelapa (10:30, 15:25, 20:20, 25:15, 30:10) dan rasio *fly ash*-gipsum (24:36, 30:30, 36:24), menghasilkan 15 variasi komposisi dengan tiga replikasi (total 45 sampel). Analisis statistik menggunakan uji normalitas Shapiro-Wilk, homogenitas Levene, ANOVA dua arah, dan uji lanjut Tukey HSD. Hasil penelitian menunjukkan seluruh formulasi memenuhi persyaratan standar untuk kadar air (1,48-4,51%) dan kerapatan (0,84-0,91 g/cm³). Namun, nilai keteguhan lentur (3,67-8,71 kgf/cm²) belum memenuhi standar minimum tipe 8 (82 kgf/cm²). Analisis statistik menunjukkan pengaruh sangat signifikan komposisi *fly ash*-gipsum terhadap keteguhan lentur (f-value=554,41; p-value<0,001) dan interaksi antar komponen terhadap kerapatan (f-value=16,148; p-value<0,001). Formulasi optimal yaitu pada rasio PP:serabut 20:20 dan *fly ash*:gipsum 24:36. Disimpulkan bahwa material ini berpotensi untuk aplikasi non-struktural seperti partisi dan panel interior, namun memerlukan optimasi lebih lanjut melalui modifikasi proses dan penambahan aditif untuk meningkatkan kinerja mekaniknya.

Keywords:
ANOVA
Cement Board
Eco-Friendly
SNI 03-2105-2006
Tukey HSD

Penulis Korespondensi:
Yessie Ardina Kusuma
Email:
yessie.ardina@umsurabaya.ac.id

This study develops an environmentally friendly cement board through the utilization of polypropylene (PP) plastic waste, coconut fiber, fly ash, and gypsum. The research aims to analyze the effect of material composition variations on the physico-mechanical characteristics according to SNI 03-2105-2006 standards and to determine the optimal formulation through a multifactorial statistical approach. The research methodology employed a 5×3 factorial design with two main factors: PP to coconut fiber ratio (10:30, 15:25, 20:20, 25:15, 30:10) and fly ash to gypsum ratio (24:36, 30:30, 36:24), resulting in 15 composition variations with three replications each (total 45 samples). Statistical analysis utilized Shapiro-Wilk normality test, Levene's homogeneity test, two-way ANOVA, and Tukey HSD post-hoc test. The results indicate that all formulations met the standard requirements for water content (1.48-4.51%) and density (0.84-0.91 g/cm³). However, the modulus of rupture values (3.67-8.71 kgf/cm²) did not meet the minimum standard for type 8 boards (82 kgf/cm²). Statistical analysis revealed highly significant effects of fly ash-gypsum composition on modulus of rupture (f-value=554.41; p-value<0.001) and component interactions on density (f-value=16.148; p-value<0.001). The optimal formulation was identified at PP:fiber ratio of 20:20 and fly ash:gypsum ratio of 24:36. It is concluded that this material shows potential for non-structural applications such as partitions and interior panels, but requires further optimization through process modifications and additive incorporation to enhance its mechanical performance.

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Papan semen merupakan salah satu material bangunan komposit yang umum digunakan sebagai partisi, langit-langit, maupun pagar pada berbagai jenis konstruksi. Produk seperti GRC (*Glassfiber Reinforced Cement*) board menjadi contoh nyata dari popularitas papan semen di pasaran karena sifatnya yang tahan api, tahan air, dan memiliki stabilitas dimensi tinggi. Secara umum, papan semen tersusun dari kombinasi dua komponen utama, yaitu matriks sebagai pengikat dan *filler* sebagai bahan penguat atau pengisi. Matriks biasanya berbasis semen Portland, sementara filler dapat berupa bahan organik maupun anorganik, baik alami seperti serat tumbuhan, maupun buatan seperti partikel plastik atau serbuk logam.

Komposisi papan semen sangat menentukan performa akhir dari material tersebut. Karakteristik seperti kekuatan lentur, densitas, kadar air, serta tampilan visual ditentukan oleh jenis dan proporsi masing-masing komponennya. *Filler* yang tepat tidak hanya meningkatkan kekuatan dan kekakuan, tetapi juga mempengaruhi bobot dan daya tahan material terhadap faktor lingkungan. Menurut (Olanda & Mahyudin, 2013), pemilihan bahan pengisi yang sesuai sangat krusial dalam menghasilkan papan semen berkualitas tinggi, terutama untuk aplikasi struktural maupun non-struktural. Lebih lanjut, (Sulastiningsih & Sutigno, 2008) menekankan pentingnya penggunaan bahan tambahan seperti katalisator, misalnya kalsium klorida ($CaCl_2$), untuk mempercepat hidrasi dan pengerasan semen. Penambahan katalis terbukti memperbaiki kompatibilitas antara semen dan bahan organik, terutama dalam campuran yang mengandung kayu atau serat alami.

Seiring meningkatnya perhatian terhadap isu lingkungan dan ketersediaan sumber daya alam, penelitian mengenai material komposit berbasis limbah mulai berkembang pesat. Serangkaian studi menunjukkan bahwa limbah organik seperti sekam padi (Wijayanti et al., 2020), eceng gondok (Qorina et al., 2016), kulit nanas (Oktaviani & Puryanti, 2020), hingga serat pisang (Randa & Mahyudin, 2019) memiliki potensi sebagai pengganti (subtitusi) bahan baku papan semen. Selain itu, ampas tebu, sabut aren, dan tempurung kelapa juga dapat meningkatkan performa mekanik papan semen sekaligus mengurangi beban lingkungan dari limbah pertanian. Potensi ini menjadikan material berbasis limbah sebagai alternatif yang tidak hanya ekonomis tetapi juga berkelanjutan.

Dengan mempertimbangkan hasil penelitian tersebut, penggunaan limbah sebagai bahan pengganti dalam papan semen dipandang sebagai pendekatan inovatif untuk meningkatkan nilai guna limbah sekaligus menekan konsumsi material konvensional. Tidak hanya itu, kehadiran bahan-bahan aditif seperti gipsum dan *fly ash* juga semakin memperkaya kemungkinan formulasi komposit papan semen yang efisien dan ramah lingkungan. Gipsum, sebagai mineral berbasis kalsium sulfat, dikenal memiliki waktu pengerasan yang sangat cepat dan bobot yang ringan (Anggela & Triastianti, 2024). Hal ini menjadikannya solusi potensial untuk mengatasi kelemahan utama papan semen, yaitu proses pengerasan yang lama dan berat jenis yang tinggi (Primasasti, 2010).

Fly ash sebagai residu hasil pembakaran batu bara, mengandung silika dan alumina dalam kadar tinggi, yang berperan dalam meningkatkan kekuatan jangka panjang serta menurunkan porositas material (Suseno et al., 2012). Di sisi lain, serabut kelapa merupakan limbah pertanian yang melimpah di Indonesia dan memiliki kekuatan tarik serta ketahanan terhadap korosi yang baik. Namun, keberadaan zat ekstraktif seperti gula dan tanin dalam serabut kelapa dapat menghambat hidrasi semen. Oleh karena itu, perlu dilakukan perlakuan awal seperti perendaman selama 24 jam sebagaimana disarankan oleh (Arisandy et al., 2024), atau metode pengolahan lain seperti *scouring* dan *bleaching* untuk meningkatkan kompatibilitas antara serat dan matriks (Amanda et al., n.d.; Eriningsih et al., 2011).

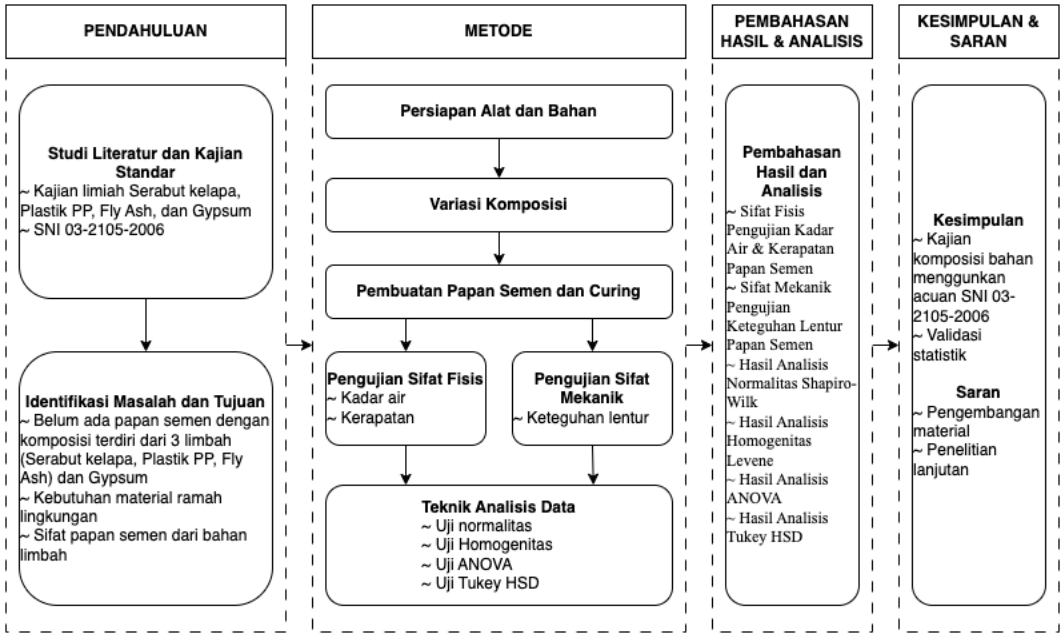
Selain bahan berbasis organik dan mineral, limbah plastik jenis polypropylene (PP) juga menunjukkan potensi tinggi sebagai bahan pengisi papan semen. Plastik PP dikenal memiliki kestabilan termal, ketahanan kimia, serta bobot yang ringan. (Kurnianingsih et al., 2022) menunjukkan bahwa penggunaan limbah plastik dalam campuran beton dan semen dapat meningkatkan daya tahan terhadap kelembapan serta menurunkan densitas material. Kombinasi plastik PP, serabut kelapa, fly ash dan gipsum yang menawarkan sinergi unik, gipsum mempercepat *setting time*, fly ash memperbaiki kekuatan jangka panjang, serabut kelapa menambah fleksibilitas dan kekakuan, serta plastik PP mengurangi bobot dan meningkatkan ketahanan terhadap air.

Penggunaan kombinasi gipsum, limbah plastik PP, limbah serabut kelapa, dan fly ash dalam satu sistem papan semen belum dieksplorasi secara mendalam, khususnya dalam konteks pemenuhan

standar mutu nasional seperti SNI 03-2105-2006. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian eksperimental dan analisis statistic untuk memahami interaksi antar bahan serta mengevaluasi performa material yang dihasilkan. Penelitian ini mempunyai tujuan: (1) mengkaji pengaruh komposisi bahan penyusun (plastik PP, serabut kelapa, fly ash dan gipsum) terhadap karakteristik fisis-mekanik papan semen, meliputi kadar air, kerapatan, dan keteguhan lentur, guna memenuhi standar performa material SNI 03-2105-2006. (2) menganalisis interaksi multifaktorial dan determinasi konfigurasi komposisi optimal berbasis pendekatan statistik parametrik (ANOVA dua arah dengan Tukey HSD) untuk mengetahui validitas temuan ilmiah. Visualisasi data melalui histogram, boxplot, dan grafik interaksi juga digunakan untuk memperjelas hubungan antar variabel dan memfasilitasi interpretasi ilmiah.

II. METODE

Alur penelitian ini disajikan pada Gambar 1. Tahapan diawali dengan (1) Identifikasi Masalah dan studi literatur, dilanjutkan dengan (2) Desain Eksperimen meliputi preparasi material, variasi komposisi, dan pengujian fisis-mekanik. Hasil eksperimen dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA dua arah dan uji Tukey HSD untuk mengidentifikasi pengaruh komposisi dan interaksi antar-bahan. Selanjutnya dilakukan pembahasan kritis terhadap hasil analisis. Tahap akhir berupa (4) Verifikasi dengan membandingkan hasil optimal terhadap standar SNI 03-2105-2006, serta merumuskan rekomendasi praktis dan arahan riset lanjutan.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dari Maret hingga Juni 2025. Pembuatan benda uji papan semen dilaksanakan di Laboratorium Beton, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surabaya. Perancangan variasi dan pengujian visual benda uji dilakukan di Laboratorium Rekayasa Industri, Program Studi Teknik Industri, Universitas Muhammadiyah Surabaya. Pengujian kadar air dan kerapatan dilaksanakan di Laboratorium Farmasi, Program Studi Farmasi, Universitas Muhammadiyah Surabaya. Sementara itu, pengujian kuat lentur dilakukan di Laboratorium Inovasi Material, Departemen Teknik Material, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

2.2 Persiapan, Perlakuan Alat dan Bahan

Persiapan meliputi parang, kantong plastik, baskom, ember 90 liter, terpal 3x2 meter, *moisture* meter digital, wadah ukur kerapatan 3x3x3 cm^3, dan timbangan analitik (ketelitian 0,01 gr). Pembuatan sampel menggunakan bak pengaduk, pengaduk, gelas ukur, cetakan papan semen terbuat dari kayu dengan ukuran dalam (cetakan 1: 10x10x1,5 cm^3 untuk uji kadar air dan kerapatan; dan cetakan 2:

20x5x1,5 cm^3 untuk uji keteguhan lentur) sejalan dengan (Okta Viano et al., 2025) dan klem. Pengujian visual dilakukan dengan kaliper digital (ketelitian 0,05 mm), penggaris, spidol, dan form pencatatan data. Pengujian sifat fisis-mekanis meliputi: kerapatan menggunakan timbangan analitik; kadar air diukur dengan oven, cawan, desikator, dan alat penunjang; keteguhan lentur diuji menggunakan mesin uji universal.

Bahan utama terdiri dari fly ash, gipsum tipe *casting*, serabut kelapa, plastik PP, dan air yang disiapkan sesuai variasi penelitian. Serabut kelapa diperoleh dari kelapa tua yang dikumpulkan dari pasar lokal (Mulyosari dan Keputih). Serabut dipisahkan dari tempurung, kemudian dibersihkan dengan air untuk menghilangkan kotoran, tanah, atau kontaminan plastik. Selanjutnya, serabut direndam selama 24 jam untuk melarutkan senyawa seperti lignin dan tanin (Amelia, 2009). Setelah pencucian ulang, serabut ditaruh di atas terpal untuk dikeringkan di bawah sinar matahari hingga kadar airnya di bawah 14% (diukur menggunakan digital moisture meter). Serabut kemudian dipotong menjadi ukuran 2–3 cm untuk memastikan distribusi merata dalam matriks semen (Yogi et al., 2020) dan disimpan dalam wadah kedap udara. Plastik PP berasal dari limbah rumah tangga (kemasan makanan) yang disortir, dicuci dengan deterjen, dan dikeringkan untuk menghilangkan kontaminan. Plastik kemudian dicacah menjadi partikel berukuran $\pm$0,5 cm agar mudah terdispersi dalam adonan semen. Ukuran seragam partikel plastik penting untuk memperoleh struktur komposit yang homogen. Sebelum digunakan, plastik disimpan dalam wadah tertutup untuk mencegah penyerapan kelembaban.

Fly ash diperoleh dari PT. Varia Usaha Beton, bersumber dari PLTU Paiton dan Tanjung Jati B (Ridwan, 2018). Sebelum digunakan, dilakukan analisis kandungan SiO_2, Al_2O_3, dan *Loss on Ignition* (LOI) untuk memastikan kualitas pozzolaniknya. Fly ash memiliki ukuran partikel 100–200 mesh dan disimpan dalam wadah kedap udara untuk mencegah penyerapan kelembaban, mengingat sifatnya higroskopis. Penggunaan fly ash meningkatkan kekuatan dan kinerja papan semen melalui reaksi pozzolanik (Jaelani & Abriantoro, 2024). Gipsum yang diperoleh diperiksa secara visual untuk memastikan tidak ada penggumpalan atau kontaminasi. Serbuk gipsum kemudian disimpan dalam wadah kedap udara guna mencegah penyerapan kelembaban, yang dapat memengaruhi reaktivitasnya dalam campuran semen.

Pengujian statistik meliputi uji normalitas Shapiro-Wilk, homogenitas Levene, Anova dua arah, dan Tukey HSD. Teknik analisis dan visualisasi statistik dilakukan menggunakan pemrograman python dengan pustaka statistik seperti *SciPy*, *Statsmodels*, *Scikit-posthocs*, *Matplotlib* dan *Seaborn*.

2.3 Variasi Komposisi Campuran

Tabel 1 Perancangan Faktorial 5x3 Variasi Komposisi Papan Semen

Variasi Komposisi	Replikasi	Faktor 1: Plastik-Serabut (%)	Faktor 2: Fly Ash-Gipsum (%)
V_1	$V_{1,1}$, $V_{1,2}$, $V_{1,3}$	10 / 30	24 / 36
V_2	$V_{2,1}$, $V_{2,2}$, $V_{2,3}$	15 / 25	24 / 36
V_3	$V_{3,1}$, $V_{3,2}$, $V_{3,3}$	20 / 20	24 / 36
V_4	$V_{4,1}$, $V_{4,2}$, $V_{4,3}$	25 / 15	24 / 36
V_5	$V_{5,1}$, $V_{5,2}$, $V_{5,3}$	30 / 10	24 / 36
V_6	$V_{6,1}$, $V_{6,2}$, $V_{6,3}$	10 / 30	30 / 30
V_7	$V_{7,1}$, $V_{7,2}$, $V_{7,3}$	15 / 25	30 / 30
V_8	$V_{8,1}$, $V_{8,2}$, $V_{8,3}$	20 / 20	30 / 30
V_9	$V_{9,1}$, $V_{9,2}$, $V_{9,3}$	25 / 15	30 / 30
V_{10}	$V_{10,1}$, $V_{10,2}$, $V_{10,3}$	30 / 10	30 / 30
V_{11}	$V_{11,1}$, $V_{11,2}$, $V_{11,3}$	10 / 30	36 / 24
V_{12}	$V_{12,1}$, $V_{12,2}$, $V_{12,3}$	15 / 25	36 / 24
V_{13}	$V_{13,1}$, $V_{13,2}$, $V_{13,3}$	20 / 20	36 / 24
V_{14}	$V_{14,1}$, $V_{14,2}$, $V_{14,3}$	25 / 15	36 / 24
V_{15}	$V_{15,1}$, $V_{15,2}$, $V_{15,3}$	30 / 10	36 / 24

Variasi perlakuan dalam penelitian ini dirancang berdasarkan pendekatan faktorial 5×3. Desain faktorial disusun dengan dua faktor utama: Faktor 1: komposisi plastik PP dan serabut kelapa terdiri dari 5 level, antara lain: 10/30; 15/25; 20/20; 25/15; 30/10. Faktor 2: komposisi fly ash dan gipsum

terdiri dari 3 level, antara lain: 24/36; 30/30; 36/24. Kombinasi lengkap dari kedua faktor tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Benda uji dinotasikan sebagai Persamaan (1). Dimana *i* adalah variasi perlakuan benda uji ke-i, dan *j* adalah replikasi benda uji ke-j. Sehingga jumlah total benda uji sebanyak 45 benda uji diperoleh dari 15 variasi dengan 3 replikasi seperti pada Persamaan (2).

$$\left\{V_{i,j} \mid i = 1,...,15; j = 1,2,3\right\} \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{15}\sum_{j=1}^{3} 1 = N = 45 \tag{2}$$

2.4 Proses Pembuatan Papan Semen

Papan semen dibuat berdasarkan variasi komposisi yang tercantum pada Tabel 1. Pencampuran bahan plastik PP, fly ash, dan gipsum dilakukan dengan cara diaduk secara merata hingga diperoleh campuran yang homogen. Selanjutnya, air ditambahkan sebanyak 70% dari total berat bahan (Nadzri et al., 2017), lalu adonan diaduk kembali hingga merata. Proses pencetakan dimulai dengan menuangkan setengah bagian adonan ke dalam cetakan, kemudian menyusun serabut kelapa menyebar ke berbagai arah, dan setelah itu menuangkan sisa adonan hingga cetakan terisi penuh. Penuangan dilakukan secara perlahan sambil ditusuk atau digoyangkan ringan untuk menghindari terbentuknya rongga udara dalam adonan. Setelah proses pencetakan selesai, campuran dipadatkan menggunakan tekanan statis dengan klem guna memastikan kepadatan yang seragam. Cetakan kemudian didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang untuk memungkinkan proses awal pengerasan secara alami. Setelah itu, papan semen dilepas dari cetakan dan dilakukan proses curing (perawatan) selama 14 hari pada suhu ruang (antara 26-30°C). Papan semen diberi label untuk memudahkan dalam mengidentifikasi.

2.5 Teknik Pengujian Fisis Karakteristik Kadar Air Papan Semen

Pengujian kadar air menurut SNI 03-2105-2006 dilakukan dengan mengeringkan sampel dalam oven pada suhu 103±5°C selama 6 jam, didinginkan dalam desikator, kemudian ditimbang menggunakan timbangan. Proses ini dilakukan berulang hingga berat konstan selisih < 0,1%. Kadar air benda uji $V_{i,j}$ dihitung menggunakan Persamaan (3), dimana B_a adalah berat awal sampel (gram) dan B_k adalah berat kering mutlak (gram). Uji kadar air untuk memastikan kondisi kering standar sebelum pengujian kuat lentur, dengan kadar air maksimum yang disyaratkan SNI tidak melebihi 14%.

$$\text{Kadar air } V_{i,j} = \frac{\left(B_{a,V_{i,j}} - B_{k,V_{i,j}}\right)}{B_{k,V_{i,j}}} \times 100\% \tag{3}$$

2.6 Teknik Pengujian Fisis Karakteristik Kerapatan Papan Semen

Pengujian kerapatan beton dalam SNI 03-2105-2006 bertujuan menentukan massa per satuan volume sampel uji lentur. Sampel diukur dimensinya (panjang, lebar, tebal), lalu ditimbang dengan timbangan. Kerapatan benda uji $V_{i,j}$ dihitung dengan Persamaan (4), dimana *M* adalah massa benda uji (gram) dan V_o adalah volume benda uji (cm^3). Standar mengharuskan pengujian dilakukan pada sampel yang telah dikondisikan dalam ruang dengan suhu dan kelembaban stabil. Nilai kerapatan digunakan untuk analisis kualitas benda uji dan hubungannya dengan kuat lentur. Kerapatan maksimum yang disyaratkan SNI antara 0,4 sampai 0,9 (g/cm^3).

$$\text{kerapatan } V_{i,j} = \frac{M_{V_{i,j}}}{V_{o,V_{i,j}}} \tag{4}$$

2.7 Teknik Pengujian Mekanik Karakteristik Keteguhan Lentur Papan Semen

Pengujian keteguhan lentur berdasarkan SNI 03-2105-2006. Bertujuan untuk menilai kemampuan material menahan beban lentur hingga patah. Sampel diletakkan pada dua tumpuan

bawah dengan jarak antar tumpuan S (cm). Beban diberikan melalui penumpu atas yang posisinya membagi jarak tumpuan bawah menjadi tiga bagian (*third-point*), dengan kecepatan pembebanan konstan 10 (mm/menit). Beban maksimum N (Kgf) saat retak pertama muncul dicatat, sementara dimensi sampel lebar L (cm) dan tebal T (cm) diukur dari benda uji $V_{i,j}$. Keteguhan lentur (Kgf/cm^2) benda uji $V_{i,j}$ dihitung menggunakan Persamaan (5). Standar ini juga mensyaratkan penumpu atas dan bawah berbentuk silinder dengan diameter minimal 10 mm.

$$\text{keteguhan Lentur } V_{i,j} = \frac{3N_{V_{i,j}} S_{V_{i,j}}}{2L_{V_{i,j}} N^2{}_{V_{i,j}}} \tag{5}$$

2.8 Teknik Analisis Data Uji Normalitas

Pengujian normalitas menggunakan Shapiro-Wilk dilakukan untuk memverifikasi apakah data sifat fisis-mekanik papan semen (kadar air, kerapatan, dan kuat lentur) berdistribusi normal. Pada penelitian ini, pengujian diaplikasikan pada setiap variasi komposisi (V_1-V_{15}) yang melibatkan proporsi gipsum, plastik PP, serabut kelapa, dan fly ash. Hipotesis nol (H_0) menyatakan data berdistribusi normal. Jika nilai p-value > 0,05, H_0 diterima, menandakan data memenuhi asumsi normalitas untuk ANOVA. Nilai statistik W diperoleh dengan Persamaan (6), dimana a_i adalah koefisien berat dari distribusi normal, V_i adalah nilai pengamatan ke-i, V_i^* adalah nilai V_i yang telah diurutkan dan dinormalisasi, dan $\bar{V}$ adalah rata-rata seluruh variasi benda uji.

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^{15} a_i V_i^*\right)^2}{\sum_{i=1}^{15}\left(V_i - \tilde{V}\right)^2} \tag{6}$$

2.9 Teknik Analisis Data Uji Homogenitas

Pengujian homogenitas Levene dilakukan untuk memastikan keseragaman varian data sifat fisis-mekanik papan semen meliputi kadar air, kerapatan, dan keteguhan lentur pada seluruh kelompok perlakuan. Data dikelompokkan menjadi tiga kategori berdasarkan perbedaan komposisi fly ash-gipsum yaitu kelompok 1 (G_1): V_1-V_5 (24/36), kelompok 2 (G_2): V_6-V_{10} (30/30), dan kelompok 3 (G_3): V_{11}-V_{15} (36/24). Hipotesis nol (H_0) menyatakan bahwa varians data bersifat homogen di semua kelompok, sedangkan hipotesis alternatif (H_1) menyatakan adanya ketidakhomogenan varians. Keputusan uji didasarkan pada nilai *p-value* dengan batas signifikansi 0.05. Apabila *p-value* lebih besar dari 0.05 maka H_0 diterima yang menunjukkan varians data homogen dan memenuhi homogenitas untuk ANOVA. Nilai statistik W diperoleh dengan Persamaan (7), dimana $N = 15$ adalah total variasi (V_1-V_{15}), $k = 3$ adalah jumlah kelompok, $n_g = 5$ adalah jumlah data dalam kelompok, Z_i adalah deviasi absolut nilai V_i terhadap median kelompoknya $Z_i = | V_i - \text{median}(V_{G_g}) |$, $\bar{Z}_g$ adalah rata-rata deviasi kelompok ke-g, dan $\bar{Z}$ adalah rata-rata deviasi seluruh data.

$$W = \frac{(N-k)}{k-1} \cdot \frac{\sum_{g=1}^{k} n_g \left(\bar{Z}_g - \bar{Z}\right)^2}{\sum_{g=1}^{k}\sum_{i \in G_g}\left(Z_i - \bar{Z}_g\right)^2} \tag{7}$$

2.10 Teknik Analisis Data Uji ANOVA

$$Y_{ij} = \mu + F1_p + F2_q + \left(F1 \times F2\right)_{pq} + \in_{ij} \tag{8}$$

Dalam konteks dua faktor, faktor 1: komposisi plastik PP-serabut kelapa (5 level: 10/30, 15/25, 20/20, 25/15, 30/10), dan faktor 2: fly ash-gipsum (3 level: 24/36, 30/30, 36/24), model ANOVA dua arah dengan interaksi ditulis sebagai Persamaan (7). Dimana Y_{ij} adalah variable respon terukur (kadar air, kerapatan, keteguhan lentur), μ adalah rata-rata populasi, $F1$ x $F2$ adalah faktor 1 dan 2, $(F1 \times F2)$

merepresentasikan efek interaksi antar faktor, dan ϵ_{ij} adalah distribusi error $\sim N(0, \sigma^2)$. Terdapat tiga pasang hipotesis: (1) efek utama komposisi PP-serabut kelapa (F1), (2) efek utama fly ash-gipsum (F2), dan (3) efek interaksi (*F1*×*F2*), dengan H₀ menyatakan tidak ada pengaruh signifikan ($F1_p = 0$, $F2_q = 0$, $(F1 \times F2)_{pq} = 0$) dan Hı menyatakan minimal satu level/pasangan level berpengaruh (α = 0,05).

2.11 Teknik Analisis Data Uji TUKEY-HSD

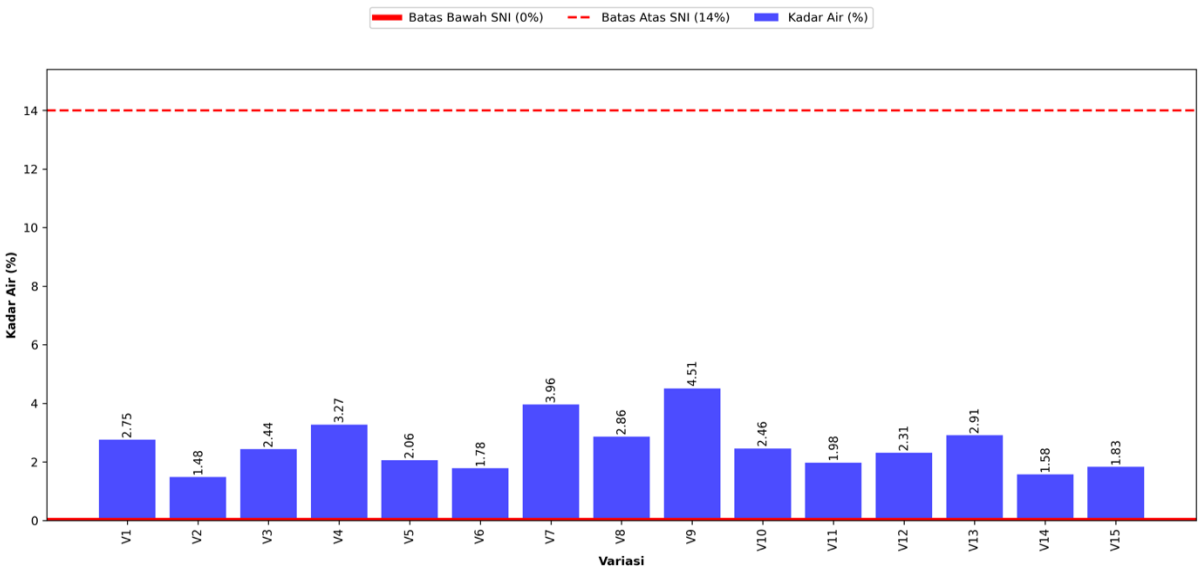
Uji Tukey HSD diterapkan sebagai analisis *post-hoc* untuk mengidentifikasi perbedaan signifikan antar seluruh pasangan kombinasi perlakuan (15 variasi komposisi) setelah hasil ANOVA menunjukkan signifikansi statistik (*p-value* < 0,05). Persamaan (9), dengan q sebagai nilai kritis distribusi studentized range (α = 0,05; k = 15 kelompok; df_E = 30 derajat kebebasan), MSE merepresentasikan mean square error dari hasil ANOVA, dan n=3 menunjukkan jumlah replikasi. Pengujian ini menguji hipotesis nol (H_0: $\mu_1 = \mu_2$) yang menyatakan tidak adanya perbedaan mean antar kelompok terhadap hipotesis alternatif (H_1: $\mu_1 \neq \mu_2$) yang menunjukkan adanya perbedaan signifikan, khususnya pada lima level komposisi Plastik PP-Serabut Kelapa (10/30, 15/25, 20/20, 25/15, 30/10) dan tiga level komposisi fly ash-gipsum (24/36, 30/30, 36/24) dalam hal kadar air, kerapatan, dan keteguhan lentur. Keputusan statistik didasarkan pada nilai *p-value* terkoreksi (*p-value-adj* < 0,05) dan interval kepercayaan 95%.

$$HSD = q_{a,k,df_E} \cdot \sqrt{\frac{MSE}{n}} \tag{9}$$

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Sifat Fisis Pengujian Kadar Air Papan Semen

Berdasarkan Gambar 2 yang dihasilkan dari Persamaan (3), nilai rerata replikasi kadar air papan semen dari semua variasi (V_1–V_{15}) menunjukkan rentang nilai antara 1,48% hingga 4,51%. Nilai kadar air tertinggi terdapat pada variasi V9 sebesar 4,51%, sementara kadar air terendah terdapat pada variasi V_2 sebesar 1,48%. Seluruh sampel berada di bawah batas maksimal kadar air menurut SNI 03-2105-2006, yaitu 14%, yang ditunjukkan oleh garis putus-putus merah dalam grafik. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh variasi telah memenuhi syarat standar nasional dari segi kadar air.



Gambar 2 Grafik Kadar Air Papan Semen Variasi (V_1–V_{15}) terhadap SNI 03-2105-2006

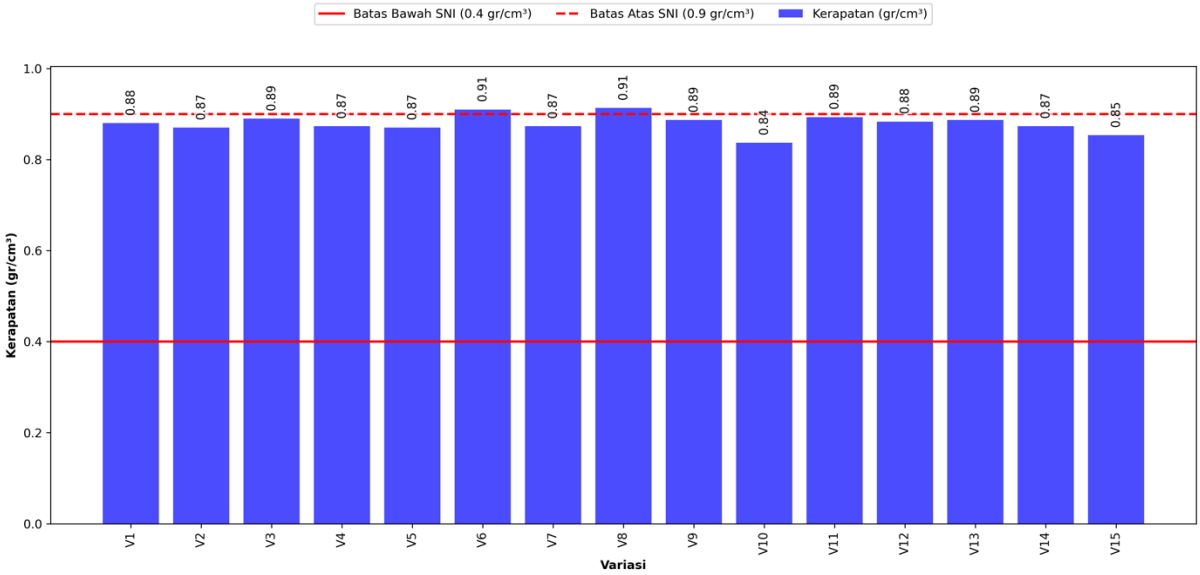
Rendahnya kadar air pada semua variasi ini mengindikasikan bahwa proses pengeringan telah berlangsung efektif atau bahwa komposisi material tidak menyimpan air dalam jumlah berlebih. Salah satu penyebab rendahnya kadar air kemungkinan adalah komposisi semen yang cukup tinggi, di mana

pori-pori menjadi lebih rapat sehingga air cepat menguap dan tidak tertahan lama di dalam struktur papan semen. Hal ini sejalan dengan temuan (Jierula et al., 2024; Winanti et al., 2015), yang menyatakan bahwa peningkatan komposisi semen menciptakan struktur yang rapat, menyebabkan kadar air tetap rendah karena air lebih cepat keluar dari sistem. Secara fisis, semakin tinggi fraksi semen maka jumlah pori kapiler yang berukuran besar berkurang dan digantikan oleh pori mikro yang lebih rapat. Pori mikro ini tidak mampu menahan air dalam jumlah besar, sehingga difusi uap air menuju permukaan berlangsung lebih cepat. Selain itu, ikatan matriks semen yang padat meningkatkan densitas dan mengurangi permeabilitas, sehingga air bebas yang tersisa lebih mudah menguap selama proses pengeringan.

3.2 Sifat Fisis Pengujian Kerapatan Papan Semen

Berdasarkan Gambar 3 yang dihasilkan dari Persamaan (4), nilai rerata replikasi kerapatan papan semen dari seluruh variasi (V_1–V_{15}) berkisar antara 0,84 g/cm³ hingga 0,91 g/cm³. Nilai kerapatan tertinggi terdapat pada variasi V_6 dan V_8 sebesar 0,91 g/cm³, sedangkan kerapatan terendah terdapat pada variasi V_{10} sebesar 0,84 g/cm³. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh variasi telah memenuhi batas bawah standar kerapatan menurut SNI 03-2105-2006, yaitu minimal 0,4 g/cm³, bahkan sebagian besar nilai kerapatan mendekati atau melampaui batas atas 0,9 g/cm³, yang dalam beberapa studi digunakan sebagai target optimal.

Secara umum, nilai rerata kerapatan papan semen berada di atas nilai ambang batas standar, menandakan bahwa papan semen yang dihasilkan memiliki struktur yang cukup padat dan kompak. Kerapatan papan semen cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kadar semen dalam campuran, yang diduga memperkuat ikatan antarpartikel serta mengisi pori-pori yang ada, sehingga menghasilkan papan dengan densitas yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan temuan (Purwanto, 2016) yang menyatakan bahwa komposisi semen yang tinggi seperti perbandingan 80:20 (semen:partikel) menghasilkan kerapatan 1,08 g/cm³, lebih tinggi dibandingkan dengan komposisi 60:40 yang hanya mencapai 1,02 g/cm³. Selain itu, menurut (Purwanto, 2016; Simbolon et al., 2015), peningkatan rasio semen akan meningkatkan ikatan antarpartikel serta mengurangi rongga kosong pada struktur papan, sehingga meningkatkan nilai kerapatan secara keseluruhan.



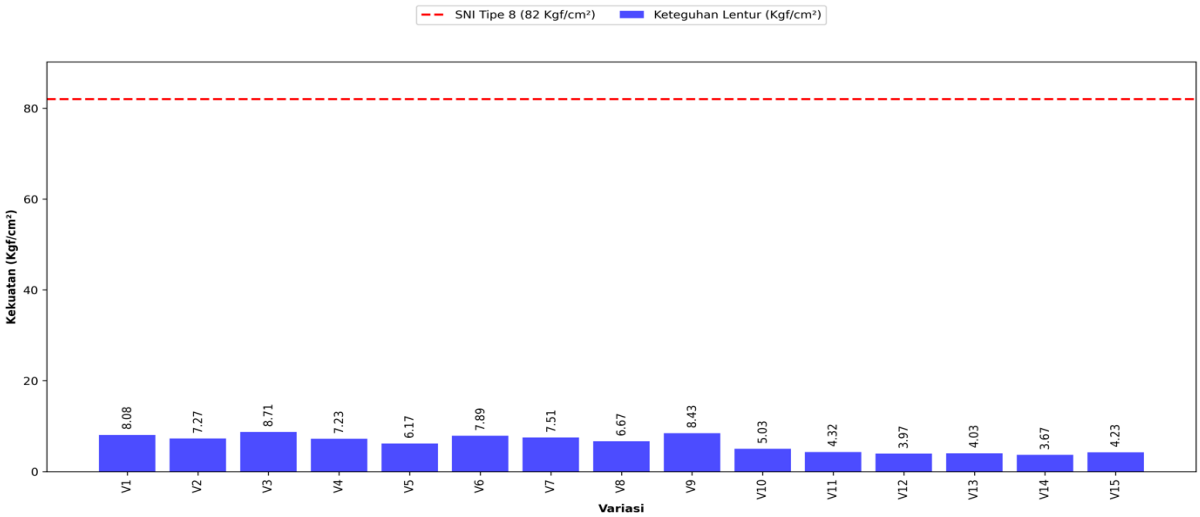
Gambar 3 Grafik Kerapatan Papan Semen Variasi (V_1–V_{15}) terhadap SNI 03-2105-2006

3.3 Sifat Mekanik Pengujian Keteguhan Lentur Papan Semen

Berdasarkan Gambar 4 yang dihasilkan dari Persamaan (5), nilai rerata keteguhan lentur papan semen dari seluruh variasi (V_1–V_{15}) berkisar antara 3,67 kgf/cm² hingga 8,71 kgf/cm². Nilai keteguhan lentur tertinggi tercatat pada variasi V3 sebesar 8,71 kgf/cm², sedangkan nilai terendah terdapat pada variasi V_{14} sebesar 3,67 kgf/cm². Jika dibandingkan dengan batas minimal keteguhan lentur yang disyaratkan dalam SNI 03-2105-2006 tipe 8, yaitu 82 kgf/cm², maka seluruh variasi belum memenuhi

standar kekuatan lentur yang ditetapkan. Hal ini menunjukkan bahwa daya tahan lentur papan semen masih tergolong rendah dan belum layak digunakan untuk aplikasi struktural sesuai tipe tersebut.

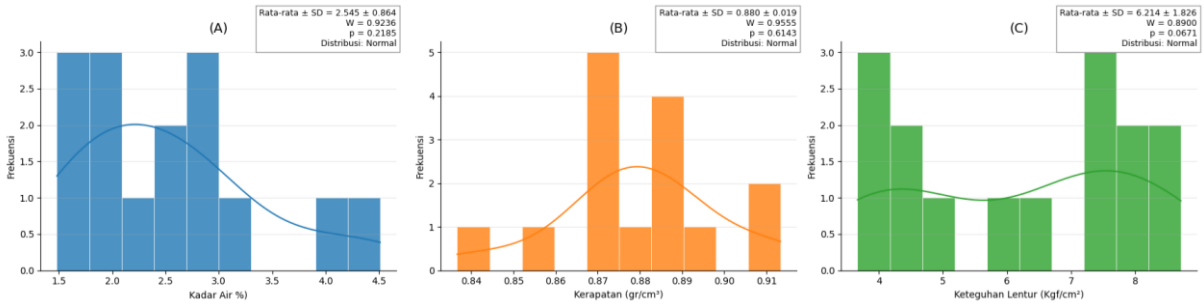
Rendahnya keteguhan lentur dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya komposisi campuran semen yang belum optimal, distribusi serat yang tidak merata, dan waktu pengkondisian yang kurang. Dalam proses ini, papan semen hanya dikondisikan selama 14 hari, adapun menurut (Adi, 2023), waktu optimal untuk proses pengeringan dan pengerasan papan semen adalah 28 hari. Pengkondisian yang terlalu cepat menyebabkan proses hidrasi semen tidak berjalan sempurna, sehingga ikatan antara semen dan material pengisi (misalnya serat, plastik, atau bahan lainnya) menjadi lemah, dan papan tidak mampu menahan beban lentur secara optimal.



Gambar 4 Grafik Kerapatan Papan Semen Variasi (V_1–V_{15}) terhadap SNI 03-2105-2006

Variasi keteguhan lentur juga dipengaruhi oleh ukuran dan distribusi partikel. Nilai yang lebih tinggi umumnya terdapat pada papan dengan partikel atau serat yang berukuran sedang, yang memungkinkan ikatan yang cukup rapat namun masih fleksibel. Sebaliknya, penggunaan serat atau partikel terlalu besar menyebabkan rongga yang lebih besar dalam struktur papan, mengurangi kohesi dan menyebabkan penurunan keteguhan lentur. Hal ini sejalan dengan (Rini & Wulandari, 2019; Vinayagamoorthy, 2020) bahwa ukuran partikel yang besar sulit diikat oleh semen dan menghasilkan ikatan mekanis yang lemah.

3.4 Hasil Analisis Normalitas Shapiro-Wilk



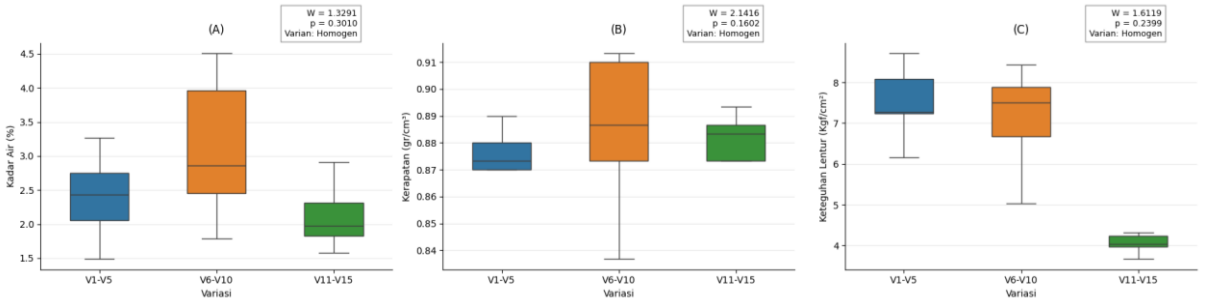
Gambar 5 Grafik Uji Normalitas Shapiro-Wilk pada (A) Kadar Air, (B) Kerapatan, dan (C) Keteguhan Lentur

Berdasarkan Gambar 5 yang dihasilkan dari Persamaan (6), dilakukan analisis normalitas menggunakan uji Shapiro-Wilk terhadap tiga parameter utama, yaitu kadar air (A), kerapatan (B), dan keteguhan lentur (C). Uji ini bertujuan untuk mengetahui apakah data yang diperoleh dari 15 variasi perlakuan mengikuti sebaran distribusi normal, yang menjadi salah satu syarat dalam uji statistik parametrik.

Pada grafik (A), nilai rata-rata kadar air sebesar 2,545% dengan standar deviasi 0,864. Hasil uji Shapiro-Wilk menunjukkan nilai W = 0,9236 dan p = 0,2185, yang lebih besar dari α = 0,05, sehingga

dapat disimpulkan bahwa data kadar air berdistribusi normal. Hal ini diperkuat dengan bentuk kurva distribusi yang mendekati pola bell-shaped meskipun terdapat sedikit kemencengan ke kanan (positif skew). Pada grafik (B), data kerapatan memiliki nilai rata-rata 0,880 g/cm³ dengan standar deviasi 0,019. Nilai Shapiro-Wilk untuk data ini adalah W = 0,9555 dan p = 0,6143, yang juga lebih besar dari 0,05, sehingga data kerapatan juga berdistribusi normal. Histogram menunjukkan distribusi yang lebih simetris dibanding kadar air, mengindikasikan sebaran data yang merata di sekitar nilai tengah. Sementara itu, pada grafik (C), data keteguhan lentur menunjukkan rata-rata sebesar 6,214 kgf/cm² dengan standar deviasi 1,826. Hasil uji Shapiro-Wilk menunjukkan nilai W = 0,8900 dan p = 0,0671, sehingga data keteguhan lentur pun berdistribusi normal. Namun, distribusinya terlihat agak menyebar dan tidak sepenuhnya simetris, meskipun masih dalam toleransi distribusi normal berdasarkan nilai p. Secara keseluruhan, ketiga parameter utama pada papan semen, yaitu: kadar air, kerapatan, dan keteguhan lentur telah memenuhi asumsi distribusi normal berdasarkan uji Shapiro-Wilk. Selanjutnya perlu mengetahui uji homogenitas.

3.5 Hasil Analisis Homogenitas Levene



Gambar 6 Grafik Uji Homogenitas Levene pada (A) Kadar Air, (B) Kerapatan, dan (C) Keteguhan Lentur

Gambar 6 menunjukkan hasil uji homogenitas varians (Levene's Test) pada tiga parameter utama, yaitu kadar air (A), kerapatan (B), dan keteguhan lentur (C), dengan pengelompokan variasi ke dalam tiga kelompok: V_1–V_5, V_6–V_{10}, dan V_{11}–V_{15}. Uji Levene digunakan untuk menguji kesamaan varians antar kelompok sebagai syarat utama sebelum dilakukan uji ANOVA.

Pada grafik (A), yaitu kadar air, uji Levene menghasilkan p-value = 0,3010 (> 0,05), sehingga varians antar kelompok dapat dinyatakan homogen. Secara visual, boxplot memperlihatkan bahwa meskipun median antar kelompok berbeda, terutama pada V_6–V_{10} yang lebih tinggi, panjang whisker relatif seimbang dan tidak terdapat pencilan ekstrem. Hal ini menandakan sebaran data antar kelompok masih seragam, sehingga perbedaan rerata dapat dianalisis lebih lanjut dengan ANOVA. Pada grafik (B), yaitu kerapatan, diperoleh p-value = 0,1602 (> 0,05) yang juga mengindikasikan varians homogen. Distribusi data pada boxplot tampak kompak dengan rentang interkuartil yang sempit, menunjukkan stabilitas nilai kerapatan antar variasi. Meskipun V_6–V_{10} menunjukkan median yang sedikit lebih tinggi, konsistensi lebar boxplot memperkuat kesimpulan bahwa perbedaan rerata lebih dominan dibandingkan variasi dalam kelompok. Sementara itu, pada grafik (C), yaitu keteguhan lentur, uji Levene memberikan p-value = 0,2399 (> 0,05). Ini berarti varians antar kelompok perlakuan juga homogen. Boxplot memperlihatkan bahwa kelompok V_{11}–V_{15} memiliki median keteguhan lentur jauh lebih rendah dibandingkan V_1–V_5 dan V_6–V_{10}, namun distribusi dalam kelompok tersebut tetap sempit dan tidak menunjukkan penyebaran ekstrem. Kondisi ini penting karena walaupun perbedaan rerata jelas terlihat, homogenitas varians memastikan bahwa asumsi dasar ANOVA tetap terpenuhi.

Berdasarkan uji Levene terhadap ketiga parameter, data kadar air, kerapatan, dan keteguhan lentur memenuhi asumsi homogenitas. Sehingga layak dilanjutkan uji ANOVA dua arah guna mengetahui pengaruh faktor 1, faktor 2 dan interaksi faktor 1 dan 2.

3.6 Hasil Analisis ANOVA

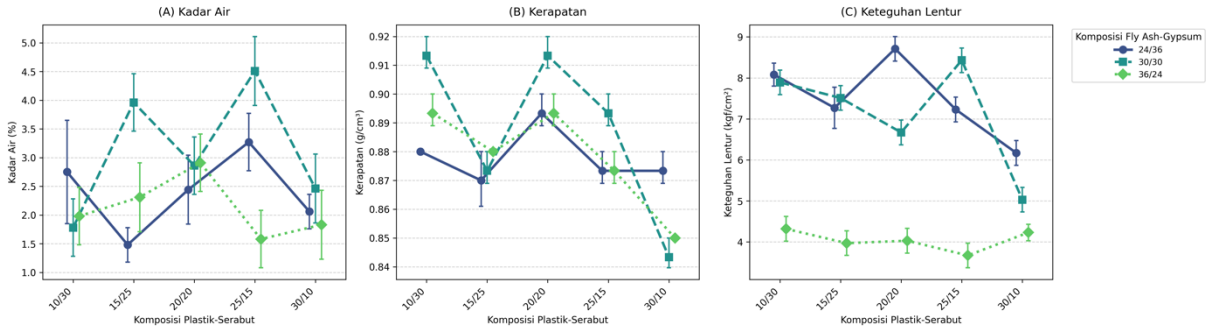
Hasil uji ANOVA dua arah (Tabel 3) menunjukkan pengaruh yang sangat signifikan (p-value < 0,001) dari faktor 1, faktor 2 dan interaksi faktor 1 dan 2 terhadap kadar air, kerapatan dan keteguhan lentur. Untuk kadar air, meskipun faktor 1 (plastik PP-serabut kelapa) signifikan (p-value = 0,003),

pengaruh faktor 2 (fly ash-gipsum) lebih dominan (f-value = 12,978 vs 5,151), sesuai dengan temuan (Irfandi, 2018) yang menunjukkan stabilitas kadar air pada komposit serat-polimer. Gambar 7A memperlihatkan fluktuasi kadar air yang tidak signifikan antar perlakuan, kecuali pada kombinasi 30/30 vs 36/24 (p-value = 0,010), dimana kandungan gipsum yang lebih tinggi pada formulasi 30/30 meningkatkan penyerapan air secara signifikan, didukung oleh penelitian (Hariyanto, 2024) tentang sifat hidrofilik gipsum.

Tabel 2 Hasil Uji ANOVA Dua Arah pada Faktor 1, Faktor 2 dan Interaksi (Faktor 1 & 2)

Sifat Material	Sumber Variasi	*Sum of Squares*	df	f-value	p-value	Signifikansi
Kadar Air	Faktor 1 (plastik PP-serabut)	6.236	4	5,151	0.003	**
	Faktor 2 (fly ash-gipsum)	7.856	2	12,978	< 0.001	***
	Interaksi (Faktor 1 & 2)	17.268	8	7,132	< 0.001	***
Kerapatan	Faktor 1 (plastik PP-Serabut)	0.011	4	90,459	< 0.001	***
	Faktor 2 (fly ash-gipsum)	0.001	2	13,852	< 0.001	***
	Interaksi (Faktor 1 & 2)	0.004	8	16,148	< 0.001	***
Keteguhan Lentur	Faktor 1 (plastik PP-serabut)	14.108	4	36,526	< 0.001	***
	Faktor 2 (fly ash-gipsum)	107.068	2	554,410	< 0.001	***
	Interaksi (Faktor 1 & 2)	18.838	8	24,387	< 0.001	***

Keterangan: *** p < 0,001, ** p < 0,01, * p < 0,05, ns = tidak signifikan.



Gambar 7 Grafik Interaksi pada (A) Kadar Air, (B) Kerapatan, dan (C) Keteguhan Lentur

Pada sifat kerapatan, faktor 1 menunjukkan pengaruh paling kuat (f-value = 90,459 dan p-value < 0,001), sejalan dengan hasil (Nurjannah et al., 2015) yang menemukan peningkatan densitas linear seiring penambahan fraksi plastik. Grafik 7B mengkonfirmasi tren ini dengan menunjukkan peningkatan kerapatan pada rasio plastik PP lebih tinggi daripada serabut kelapa 30/10, terutama ketika dikombinasikan dengan formulasi fly ash-gipsum 30/30. Temuan ini konsisten dengan penelitian (Ridho & Mahyudin, 2022) tentang optimasi densitas melalui penyeimbangan komponen organik-anorganik.

Untuk keteguhan lentur, hasil ANOVA menunjukkan pengaruh sangat signifikan dari kedua faktor dan interaksinya (p-value < 0,001), dengan faktor 2 (fly ash-gipsum) memberikan kontribusi terbesar (f-value = 554,410). Grafik 7C secara jelas menunjukkan titik optimum pada kombinasi 20/20 (plastik PP-serabut kelapa) × 24/36 (fly ash-gipsum), didukung temuan (Budiman et al., 2023) tentang rasio optimal untuk kekuatan lentur. Penurunan signifikan pada formulasi fly ash-gipsum 36/24 (p-value < 0,001) sejalan dengan penelitian (Purwanto, 2016) mengenai pembentukan fase tidak homogen saat kandungan fly ash berlebihan. Analisis komprehensif ini menunjukkan bahwa pencapaian sifat material optimal memerlukan pendekatan holistik yang mempertimbangkan interaksi kompleks antar komponen penyusun.

3.7 Hasil Analisis Tukey HSD

Hasil uji Tukey HSD yang dirangkum pada Tabel 4 mengidentifikasi beberapa pasangan komposisi bahan yang menunjukkan perbedaan signifikan terhadap sifat fisis-mekanik papan semen. Pada kadar air, hanya 1 pasangan komposisi yang menunjukkan perbedaan yang signifikan, yaitu antara formulasi fly ash–gipsum, yaitu 30/30 dan 36/24 dengan selisih −0,992 (p-value = 0,010). Rentang interval kepercayaan yang tidak melintasi nol ([−1,773, −0,210]) memperkuat validitas hasil tersebut.

Temuan ini sejalan dengan penelitian (Rambe et al., 2023), yang menunjukkan bahwa peningkatan kandungan gipsum hingga 30% cenderung meningkatkan sifat hidrofilik material, sehingga memperbesar kemampuan menyerap air. Sementara itu, 44 pasangan lainnya tidak menunjukkan perbedaan bermakna (p-value > 0,05), menandakan bahwa variasi kadar air dalam mayoritas formulasi masih berada dalam rentang yang dapat diterima menurut SNI 03-2105-2006.

Pada aspek kerapatan, 2 dari 45 pasangan komposisi tercatat memberikan hasil signifikan. Kombinasi plastik PP–serabut kelapa × fly ash–gipsum, yaitu 10/30 × 24/36 dibandingkan dengan 30/10 × 30/30 menghasilkan peningkatan kerapatan sebesar 0,07 (p-value < 0,001), sedangkan komposisi 15/25 × 24/36 dengan 30/10 × 30/30 menunjukkan peningkatan 0,03 (p-value < 0,001). Kedua perbandingan ini menunjukkan bahwa kombinasi 30/10 (plastik PP–serabut kelapa) dan 30/30 (fly ash–gipsum) cenderung menghasilkan material dengan kerapatan tinggi. Hasil ini selaras dengan penelitian (Wang et al., 2025), bahwa keseimbangan antara polimer termoplastik dan pengisi anorganik dapat meningkatkan efisiensi kerapatan, sehingga menghasilkan struktur yang lebih padat dan stabil.

Tabel 3 Hasil Signifikan Uji Tukey HSD untuk Parameter Papan Semen

Parameter	Kelompok 1	Kelompok 2	*Mean Difference*	95% CI	p-value	Signifikansi
Kadar Air	30/30	36/24	-0,992	[-1,773, -0,210]	0,010	*
Kerapatan	10/30 × 24/36	30/10 × 30/30	-0,070	[-0,087, -0,053]	< 0,001	***
	15/25 × 24/36	30/10 × 30/30	-0,030	[-0,047, -0,013]	< 0,001	***
Keteguhan Lentur	10/30 × 24/36	10/30 × 36/24	-3,760	[-4,695, -2,825]	< 0,001	***
	20/20 × 24/36	20/20 × 36/24	-4,680	[-5,615, -3,745]	< 0,001	***

Keterangan: *** p < 0,001, ** p < 0,01, * p < 0,05, ns = tidak signifikan.

Sementara itu, untuk keteguhan lentur, 2 pasangan komposisi menunjukkan perbedaan sangat signifikan. Perbandingan antara plastik PP–serabut kelapa × fly ash–gipsum, yaitu 10/30 × 24/36 dan 10/30 × 36/24 menunjukkan penurunan kekuatan lentur sebesar 3,76 satuan (p-value < 0,001), sedangkan pasangan 20/20 × 24/36 dan 20/20 × 36/24 mengalami penurunan lebih besar, yakni 4,68 (p-value < 0,001). Hasil ini memberikan bukti kuat bahwa peningkatan kadar fly ash tanpa diimbangi oleh komposisi gipsum yang memadai dapat berdampak negatif terhadap sifat mekanik papan semen. Hal ini sejalan dengan penelitian (Li & Ran, 2023), bahwa kandungan fly ash di atas 30% dapat mengganggu proses hidrasi dan menurunkan kekuatan matriks hingga 45%. Sebaliknya, keberadaan gipsum dalam rasio seimbang tampak berperan sebagai penguat utama dalam struktur material.

Secara keseluruhan, integrasi hasil uji ANOVA dua arah dan Tukey HSD mengarah pada tiga analisis penting. Pertama, tingkat pengaruh antar komponen berbeda-beda: komposisi fly ash–gipsum memiliki pengaruh terbesar terhadap keteguhan lentur (f-value = 554,41) dan kadar air (f-value=12,978), sedangkan kombinasi plastik–serabut kelapa lebih dominan dalam memengaruhi kerapatan (f-value = 90,459). Kedua, formulasi optimal berbeda tergantung pada tujuan aplikatif: kombinasi plastik PP–serabut kelapa × fly ash–gipsum, yaitu 20/20 × 24/36 lebih sesuai untuk kebutuhan struktural dengan ketahanan tinggi, sementara 30/10 × 30/30 lebih diterapkan pada produk yang memerlukan kerapatan maksimum. Ketiga, interaksi antar komponen bersifat non-linear dan kompleks, di mana efek sinergistik hanya muncul pada proporsi tertentu, sebagaimana sesuai dengan penelitian (MUTUK et al., 2023) dalam teori komposit.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil kajian pengaruh komposisi bahan penyusun (plastik PP, serat kelapa, fly ash, dan gipsum) terhadap karakteristik fisis-mekanik papan semen, di mana seluruh formulasi memenuhi standar kadar air (1,48-4,51%) dan kerapatan (0,84-0,91 g/cm³) sesuai SNI 03-2105-2006. Namun, keteguhan lentur (3,67-8,71 kgf/cm²) belum mencapai standar tipe 8 (82 kgf/cm²). Analisis statistik multifaktorial menunjukkan bahwa komposisi fly ash-gipsum berpengaruh sangat signifikan terhadap keteguhan lentur (f-value = 554,41, p-value < 0,001), sedangkan interaksi antara plastik PP-serat kelapa dan fly ash-gipsum signifikan terhadap kerapatan (f-value = 16,148, p-value < 0,001). Konfigurasi

optimal ditemukan pada rasio 20/20 untuk plastik PP-serabut kelapa dan 24/36 untuk fly ash-gipsum, yang menghasilkan sifat material terbaik meskipun masih memerlukan peningkatan lebih lanjut untuk mencapai standar keteguhan lentur.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengeksplorasi perlakuan tambahan pada bahan baku (plastik PP dan serabut kelapa) untuk meningkatkan adhesi dengan matriks semen, mempertimbangkan perpanjangan waktu curing, penambahan bahan aditif guna meningkatkan keteguhan lentur papan semen. Selain itu, perlu dilakukan studi lanjutan untuk menguji daya tahan material terhadap faktor lingkungan seperti kelembaban dan suhu ekstrem, analisis ekonomi untuk menilai kelayakan produksi, serta pendekatan berbasis algoritma komputasional untuk memperoleh komposisi yang lebih optimal dengan mempertimbangkan lebih banyak variabel dan interaksi kompleks antar bahan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada Majelis Diktilitbang dan RisetMU yang telah mendanai penelitian ini. Kepada Fakultas Teknik, Teknik Sipil, Teknik Industri, Teknik Farmasi UMSurabaya yang telah meminjamkan Laboratoriumnya. Kepada PT. Varia Usaha Beton yang telah memberi dukungan bahan baku fly ash. Kepada Teknik Material ITS yang telah membantu dalam pengujian keteguhan lentur.

DAFTAR PUSTAKA

Adi, T. P. (2023). Pengaruh Perawatan Beton (Curing) Terhadap Kuat Tekan Beton Normal. *JITSi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, *3*(2), 121–126.

Amanda, A., Ratih, D. N., & Mulyawati, E. (n.d.). The effect of sisal (Agave Sisalana) nanofiber in epoxy resin sealer on root canal obturation's push-out bond strength. *Majalah Kedokteran Gigi Indonesia*, *7*(3), 137–145.

Amelia, S. (2009). Pengaruh perendaman panas dan dingin sabut kelapa terhadap kualitas papan partikel yang dihasilkannya. *Skripsi. Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia*.

Anggela, P., & Triastianti, R. D. (2024). Teknologi Tepat Guna Pemanfaatan Serat Batang Pisang dan Sekam Padi Sebagai Bahan Campuran Pembuatan Plafon. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, *24*(2), 8–16.

Arisandy, E. A., Fahriani, V. P., Wahyuningtyas, A., & Hakim, A. (2024). Pengaruh Waktu Perendaman Sabut Kelapa Dalam Ekstrak Kulit Batang Bakau Terhadap Intensitas warna dan Tahan Luntur dengan Fiksator Jeruk Nipis. *Jurnal Serambi Engineering*, *9*(2), 8373–8378.

Budiman, S. A., Sulardjaka, S., & Iskandar, N. (2023). Analisis Kekuatan Lentur Komposit Berpenguat Serat Rami Dengan Matriks Gondorukem Pada Fraksi Massa 15% Dan 30%. *Jurnal Teknik Mesin*, *11*(1), 32–39.

Eriningsih, R., Suantara, D., & Mutia, T. (2011). Eksplorasi Desain Permukaan Pada Bahan Non Woven Sabut Kelapa Untuk Produk Kreatif. *Arena Tekstil*, *26*(1), 53465.

Hariyanto, A. (n.d.). Peningkatan Kinerja Impak Pada Rekayasa Bahan Komposit Berpenguat Coconut Fiber Bermatrik Gypsum Untuk Decorative Panelling. *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, *15*(2).

Irfandi, I. (2018). Pembuatan dan Karakterisasi Papan Partikel Komposit Dari Limbah Serbuk Tempurung Kelapa Dengan Pengikat Pelastik High Density Polyethylene (Hdpe) Daur Ulang. *AGRIUM: Jurnal Ilmu Pertanian*, *21*(2), 202–209.

Jaelani, B., & Abriantoro, A. P. (2024). Studi Eksperimental Substitusi Fly Ash 30%, 35% dan 40% Pada Beton SCC Terhadap Waktu Ikat, Flowability, Porositas dan Kuat Tekan Beton dalam Resistensi Asam Sulfat. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, *10*(2), 75–88.

Jierula, A., Li, H., Chen, Y., Wu, C., Wu, X., & Yin, H. (2024). Study on the Influence of Density and Water–Cement Ratio on the Cement Utilization, Fluidity, Mechanical Properties, and Water Absorption of Foam Concrete. *Buildings*, *14*(11), 3550.

Kurnianingsih, O., HS, C. G. P., & Rahmi, A. T. (2022). Inovasi Penggunaan Serat Masker dan Botol Plastik Pada Campuran Beton Ramah Lingkungan. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, *11*(2), 172–178.

Li, X., & Ran, M. (2023). Gypsum-Based humidity-control material: Preparation, performance and its impact on building energy consumption. *Materials*, *16*(15), 5211.

MUTUK, T., ARPACIOĞLU, K., ALIŞIR, S., & DEMiR, G. (2023). Thermal and mechanical evaluation of natural fibers reinforced gypsum plaster composite. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, *33*(1), 116–123.

Nadzri, N. I. M., Shamsul, J. B., & Mazlee, M. N. (2017). Development and properties of composite cement reinforced coconut fiber with the addition of fly ash. *ArXiv Preprint ArXiv:1705.00179*.

Nurjannah, N., Hernawati, H., & Rahmaniah, R. (2015). Analisis Papan Komposit dari Limbah Plastik Polyprophylene (PP) dan Sekam Padi. *JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya*, *2*, 23–32.

Okta Viano, R., Marthiana, W., & Arman, R. (2025). Karakterisasi Fisik dan Mekanik Papan Komposit Serat Kelapa dan Limbah Plastik Pet Mengacu pada Standar SNI 03-2105-2006. *Mesin*, *30*(2), 75–95. https://doi.org/10.5614/mesin.2025.30.2.1

Oktaviani, S., & Puryanti, D. (2020). Pengaruh Penambahan Serat Daun Nanas terhadap Sifat Fisis dan Mekanik Papan Semen Gipsum. *Jurnal Fisika Unand*, *9*(1), 31–37.

Olanda, S., & Mahyudin, A. (2013). Pengaruh Penambahan Serat Pinang (Areca Catechu L. Fiber) Terhadap Sifat Mekanik Dan Sifat Fisis Bahan Campuran Semen Gipsum. *Jurnal Fisika Unand*, *2*(2).

Primasasti, D. K. (2010). Tinjauan kuat tekan dan kuat lentur repair mortar dengan bahan tambah polymer *(investigation of compression strength and flexural strength of repair mortar with polymer additive)*.

Purwanto, D. (2016a). Sifat Fisis dan Mekanis Papan Semen dari Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (The Physical and Mechanical Properties of Cement Board Made from Oil Palm Empty Fruit Bunches Fibers). *Indonesian Journal of Industrial Research*, *8*(2), 43–52.

Purwanto, D. (2016b). Sifat Fisis dan Mekanis Papan Semen dari Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (The Physical and Mechanical Properties of Cement Board Made from Oil Palm Empty Fruit Bunches Fibers). *Indonesian Journal of Industrial Research*, *8*(2), 43–52.

Qorina, U., Mahyudin, A., & Handani, S. (2016). Pengaruh Persentase Massa Gipsum Dan Serat Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Papan Semen-Gipsum Berserat Enceng Gondok. *Jurnal Fisika Unand*, *5*(3), 233–237.

Rambe, M. R., Pohan, R. F., Patriotika, F., Harahap, S., & Nasution, A. S. (2023). Potential of Gypsum Waste as a Substitution and Filler Material in Concrete Manufacturing. *Fluida*, *16*(2), 120–131.

Randa, R., & Mahyudin, A. (2019). Pengaruh Persentase Serat Pelepah Pisang Terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Papan Semen-Foam agent. *Jurnal Fisika Unand*, *8*(1), 46–51.

Ridho, R., & Mahyudin, A. (2022). Pengaruh Penggunaan Serat Plastik Sebagai Pengganti Serat Kaca pada Papan Beton Ringan. *Jurnal Fisika Unand*, *11*(1), 97–103.

Ridwan, M. (2018). Karakteristik Beton Geopolimer Menggunakan Limbah Fly ash PLTU Tanjung Jati B Jepara.

Rini, D. S., & Wulandari, F. T. (2019). Pengaruh Ukuran Partikel Dan Perlakuan Pendahuluan Terhadap Sifat Fisika Papan Semen Partikel Pelepah Lontar (Borasus Flabellifer Linn). *Jurnal Silva Samalas*, *2*(2), 71–74.

Simbolon, I. L., Sucipto, T., & Hartono, R. (2015). Pengaruh Ukuran Partikel dan Komposisi Semen Partikel terhadap Kualitas Papan Semen dari Cangkang Kemiri (Aleurites Moluccana Wild). *Peronema Forestry Science Journal*, *4*(1), 41–48.

Sulastiningsih, I. M., & Sutigno, P. (2008). Standardisasi Mutu Kayu untuk Papan Semen. Di dalam. *Prosiding PPI Standardisasi*.

Suseno, H., Prastumi, P., Susanti, L., & Setyowulan, D. (2012). Pengaruh penggunaan bottom ash sebagai pengganti tanah liat pada campuran bata terhadap kuat tekan bata. *Rekayasa Sipil*, *6*(3), 272–281.

Vinayagamoorthy, R. (2020). Effect of particle sizes on the mechanical behaviour of limestone-reinforced hybrid plastics. *Polymers and Polymer Composites*, *28*(6), 410–420.

Wang, Q., Lou, Y., Peng, Y., Wang, W., Luo, X., & Smith, A. S. J. (2025). Investigation into Improving the Water Resistance and Mechanical Properties of Calcined Gypsum from Phosphogypsum Composites. *Materials*, *18*(12), 2703.

Wijayanti, H., Ratnasari, D., & Hakim, R. (2020). Studi kinetika pirolisis sekam padi untuk menghasilkan bio-oil sebagai energi alternatif. *Buletin Profesi Insinyur*, *3*(2), 83–88.

Winanti, R. P., Hakim, L., & Sucipto, T. (2015). Pengaruh Rasio Semen Dan Partikel Terhadap Kualitas Papan Semen Dari Limbah Partikel Industri Pensil. *Skripsi. Fakultas Kehutanan. Universitas Sumatera Utara*.

Yogi, Y., Yani, A., & Nurhaida, N. (2020). Sifat Fisik dan Mekanik Papan Semen Berdasarkan Komposisi dan Ukuran Serat Sabut Kelapa (Cocos nucifera). *Jurnal Hutan Lestari*, *9*(4), 619–630.