

BAB IV

HASIL PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan

Dilakukan beberapa pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kelayakan bahan pembuatan benda uji, seperti pengujian pasir dengan menguji gradasi butiran dan kadar lumpur. Melakukan pengamatan visual semen, *fiberglass*, serbuk cangkang telur dan air.

4.1.1 Pengujian Analisis Saringan

Pengujian analisis saringan dilakukan dengan mengacu pada SNI 03-1968-1990 mengenai analisis saringan agregat halus. Hasil pengujian gradasi dapat dilihat pada **Tabel 4.1** dibawah ini.

Tabel 4.1 Hasil Uji Saringan

Saringan		Berat Tertahan	Berat Tertahan (%)	Berat Tertahan Komulatif (%)	Berat lolos saringan komulatif (%)
mm	inch	gram (a)	(b) = (a)/W	(c)	(d) = 100 – (c)
4,75	No 4	78,7	7,87%	7,87%	92,13%
2,36	No 8	176	17,60%	25,47%	74,53%
1,18	No 16	200,6	20,06%	45,53%	54,47%
0,6	No 30	157	15,70%	61,23%	38,77%
0,3	No 50	168,5	16,85%	78,08%	21,92%
0,15	No 100	76,8	7,68%	85,76%	14,24%
0,075	No 200	83,9	8,39%	94,15%	5,85%
PAN		54,1	5,41%	99,56%	0,44%
Total (W)		995,6	99,56%		

$$\begin{aligned}
 \text{Kehilangan berat} &= \text{berat awal} - \text{berat sisa} \\
 &= 1000 - 995,6 \\
 &= 4,4 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Persentase} &= \frac{4,4}{1000} \times 100 \\
 &= 0,44 \% < 1\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FM &= \frac{\text{Jumlah sisa diatas saringan } 0,150}{100} \\
 &= \frac{303,94}{100} \\
 &= 3,04 \text{ (kasar)}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.2 Modulus Kehalusan Pasir

Jenis Pasir	Modulus Kehalusan	Sisa di Atas Saringan 0,6 mm
Sangat kasar	3,7	75 – 80 %
Kasar	2,6 – 3,6	50 – 75 %
Sedang	1,9 – 2,5	35 – 50 %
Halus	1,5 – 2,0	20 – 35 %
Sangat halus	1,1 – 1,6	7 – 20 %

Sumber: SNI 03-1968-1990

Berdasarkan hasil pengujian saringan yang ditunjukkan pada tabel di atas agregat halus bersifat kasar dan dapat digunakan sesuai SNI 03-1968-1990.

4.1.2 Pengujian Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur bertujuan untuk mengetahui persentase kandungan lumpur pada agregat halus. Pengujian dilakukan dengan cara sistem kocokan dan berpedoman pada SNI S-04-1998-F. Kandungan lumpur berpedoman pada SNI adalah dengan batas maksimal 5%. Karena kandungan lumpur yang berlebih dapat menurunkan daya ikat semen dan pasir dan dapat menurunkan mutu rencana. Hasil pengujian kadar lumpur dapat dilihat pada **Tabel 4.3** di bawah ini.

Tabel 4.3 Hasil Uji Kadar Lumpur Agregat Halus

Kondisi	Ketinggian (ml)
Tinggi pasir + lumpur	239
Tinggi pasir	230
Tinggi lumpur	9

$$\begin{aligned}
 \text{Kandungan lumpur} &= \frac{9}{239} \times 100 \% \\
 &= 3,76 \%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, kadar lumpur yang terkandung pada pasir sebesar $3,76\% \leq 5\%$. Kadar tersebut memenuhi SNI S-04-1998-F yang dimana kandungan lumpur pada agregat halus tidak boleh melebihi 5%.

4.1.3 Uji Waktu Ikat Semen

Pengujian ikat semen dilakukan untuk mengetahui waktu yang diperlukan semen mencapai kondisi ikat awal dan ikat akhir setelah bereaksi dengan air. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik pengikatan yang sesuai sehingga dapat mendukung proses pembuatan dan pengerasan benda uji secara optimal. Hasil pengujian waktu ikat semen berpedoman pada SNI 2049-2015 dapat dilihat pada **Tabel 4.4** berikut.

Tabel 4.4 Hasil Uji Ikat Semen

Waktu (menit)	Penurunan (mm)
15	42
30	45
45	45
60	43
75	41
90	42
105	35
120	33
135	25

Berdasarkan hasil pengujian vicat, waktu ikat awal semen diperoleh pada menit 135 dengan nilai penetrasi jarum tepat jauh dikedalaman penetrasi 25 mm. Hasil tersebut memenuhi persyaratan SNI 2049:2015 yang mensyaratkan waktu ikat awal minimum 45 menit. Oleh karena itu, semen yang diuji memenuhi dan layak digunakan sebagai bahan pengikat dalam pembuatan plafon GRC.

4.1.4 Uji Waktu Ikat Semen Substitusi Cangkang Telur 5%

Pengujian ikat semen yang disubstitusi serbuk cangkang tekur sebesar 5% dilakukan untuk mengetahui waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi ikat semen setelah bereaksi dengan air. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik

pengikatan yang sesuai sehingga dapat mendukung proses pembuatan dan pengerasan benda uji secara optimal. Hasil pengujian ikat semen yang telah disubstitusi cangkang telur sebanyak 5% dapat dilihat pada **Tabel 4.5** berikut.

Tabel 4.5 Uji Ikut Semen Substitusi Cangkang Telur 5%

Waktu (menit)	Penurunan (mm)
15	43
30	46
45	39
60	35
75	25

Berdasarkan data pengujian, waktu ikat awal semen dengan substitusi cangkang telur 5% menjadi lebih singkat (75 menit) dibandingkan semen murni (135 menit) karena kandungan kalsium karbonat ($CaCO_3$) yang tinggi pada cangkang telur bertindak sebagai akselerator alami yang mempercepat reaksi hidrasi semen (Mtallib & Rabi, 2009). Menurut Tangboriboon dkk. (2019), partikel halus dari serbuk cangkang telur ini berfungsi sebagai situs nukleasi (*nucleation sites*) yang mempercepat pengendapan produk-produk hidrasi, serta bereaksi secara kimia dengan trikalsium aluminat (C_3A) pada semen untuk membentuk senyawa monokarboaluminat dalam waktu yang lebih singkat. Akibat dari percepatan pembentukan matriks kristal hidrasi ini, konsumsi air bebas dalam pasta semen meningkat lebih cepat sehingga memicu pengakuan pasta yang lebih awal dan mempercepat tercapainya batas penetrasi jarum Vicat sebesar 25 mm. Hasil tersebut memenuhi persyaratan SNI 2049:2015 yang mensyaratkan waktu ikat awal minimum 45 menit. Oleh karena itu, semen yang diuji memenuhi dan layak digunakan sebagai bahan pengikat dalam pembuatan plafon GRC.

4.2 Data dan Perhitungan Hasil Pengujian

Hasil pengujian dan perhitungan dari hasil uji kuat lentur, penyerapan air, penyerapan panas, ketahanan terhadap api dan kerapatan. Pengujian dilakukan di laboratorium teknik infrastruktur sipil dan perancangan arsitektur sekolah vokasi universitas Diponegoro.

4.2.1 Uji Kuat Lentur

Melalui data yang diperoleh pada pengujian kuat lentur, maka dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai rata-rata kuat lenturnya. Data perhitungan disajikan pada **Tabel 4.6** sebagai berikut:

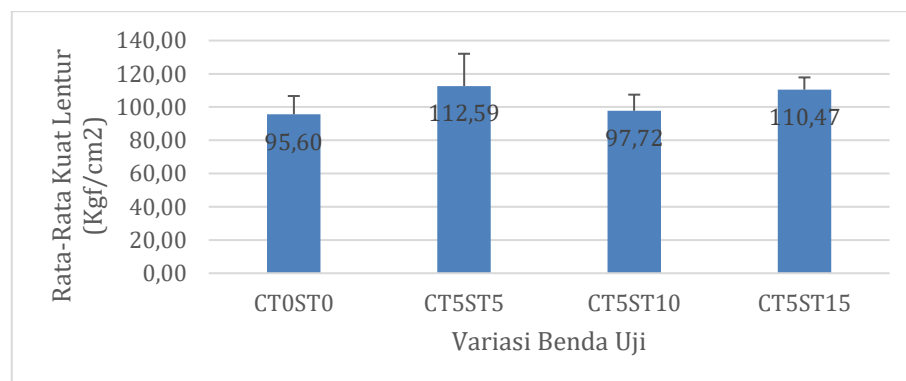
Tabel 4.6 Hasil Uji Kuat Lentur

Variasi	Kode	lebar (cm)	tebal (cm)	jarak sanggah (cm)	Beban Maksimal Spesimen (kN)	Beban Maksimal Spesimen (Kgf)	Kuat Lentur (Kgf/cm²)	Rata-rata (Kgf/cm²)	Standar SNI 01- 4449- 2006
GRC A (CT0ST0)	A1	10	0,6	15	0,13	13,26	82,85	95,60	≥35 kgf/c m2
	A2	10	0,6	15	0,16	16,32	101,97		
	A3	10	0,6	15	0,16	16,32	101,97		
GRC B (CT5ST5)	B1	10	0,6	15	0,17	17,34	108,35	112,59	
	B2	10	0,6	15	0,21	21,41	133,84		
	B3	10	0,6	15	0,15	15,30	95,60		
GRC C (CT5ST10)	C1	10	0,6	15	0,14	14,28	89,23	97,72	
	C2	10	0,6	15	0,15	15,30	95,60		
	C3	10	0,6	15	0,17	17,34	108,35		
GRC D (CT5ST15)	D1	10	0,6	15	0,16	16,32	101,97	110,47	
	D2	10	0,6	15	0,18	18,35	114,72		
	D3	10	0,6	15	0,18	18,35	114,72		

Keterangan:

Variasi Terendah = 

Variasi Terbaik = 



Gambar 4.1 Grafik Kuat Lentur

Dari hasil pengujian yang tersaji pada **Tabel 4.6**, seluruh variasi papan GRC yang diuji telah melampaui ambang batas minimum standar SNI 01-4449-2006 yaitu sebesar $\geq 35 \text{ kgf/cm}^2$, sehingga secara struktural dinyatakan sangat layak diaplikasikan sebagai material plafon. Varian kontrol A (CT0ST0) mencatatkan nilai rata-rata kuat lentur terendah sebesar $95,60 \text{ kgf/cm}^2$ akibat sifat getas komersial *fiberglass* murni saat menahan beban transversal. Karakteristik mekanis ini mengalami peningkatan optimal pada Varian B (CT5ST5) yang menjadi variasi terbaik dengan nilai kuat lentur mencapai $112,59 \text{ kgf/cm}^2$. Peningkatan signifikan ini didorong oleh kemampuan serat tebu dalam mendistribusikan tegangan tarik secara merata melalui mekanisme penyerapan energi beban (*bridging effect*) (Simanullang et al., 2022). Meskipun pada Varian C (CT5ST10) nilai kuat lenturnya sempat mengalami reduksi menjadi $97,72 \text{ kgf/cm}^2$ akibat jumlah serat yang sebarannya kurang merata, nilai tersebut kembali naik pada Varian D (CT5ST15) menjadi $110,47 \text{ kgf/cm}^2$ seiring dengan terbentuknya susunan serat yang semakin padat dan kokoh dalam menahan beban lentur maksimal.

Ketidak konsistenan hasil antar spesimen juga dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor lain selama proses pembuatan benda uji, antara lain perbedaan tingkat pemadatan saat pencetakan, variasi rasio air semen aktual akibat penyerapan air oleh serat tebu, terbentuknya rongga udara (*air void*), dan orientasi serat yang berbeda pada setiap cetakan.

4.2.2 Uji Penyerapan Air

Hasil pengujian daya serap air yang diperoleh pada setiap benda uji selanjutnya diolah untuk menentukan nilai rata-rata daya serap air dari masing-masing variasi campuran. Data hasil pengujian daya serap air disajikan pada **Tabel 4.7** berikut.

Tabel 4.7 Hasil Uji Penyerapan Air

Variasi	Kode Sampel	MK (gr)	MB (gr)	Penyerapan Air (%)	Rata-Rata Penyerapan Air (%)	Nilai Maksimum SNI 01-4449-2006
GRC A (CT0ST0)	A1	102,8	112,9	9,82	8,5	<35%
	A2	102,8	110	7		

Variasi	Kode Sampel	MK (gr)	MB (gr)	Penyerapan Air (%)	Rata-Rata Penyerapan Air (%)	Nilai Maksimum SNI 01-4449-2006
GRC B (CT5ST5)	A3	85,49	92,9	8,67	10,53	
	B1	84,9	93,8	10,48		
	B2	93	102,4	10,11		
	B3	100,3	112	11		
GRC C (CT5ST10)	C1	90,8	100	10,13	10,34	
	C2	95,5	105,4	10,37		
	C3	105,5	116,6	10,52		
GRC D (CT5ST15)	D1	100	110	10	10,26	
	D2	91,8	101,4	10,46		
	D3	101,8	112,3	10,31		

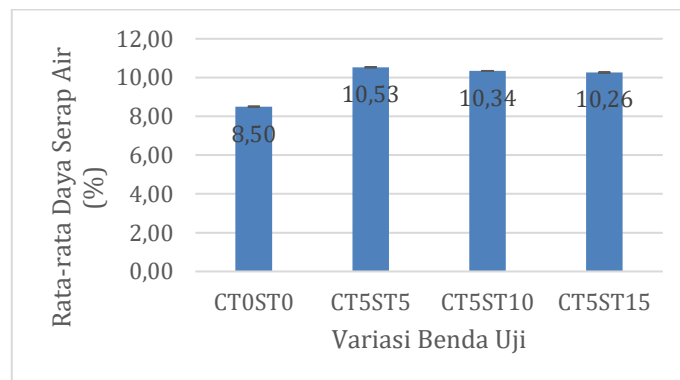
Keterangan:

mb = massa basah benda uji (gr)

mk = massa kering benda uji (gr)

Variasi Terendah =

Variasi Terbaik =



Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji Penyerapan Air

Berdasarkan **Gambar 4.2** dapat disimpulkan dari uji penyerapan air yang telah dilakukan pada masing-masing variasi benda uji berukuran 10 x 10 x 0,6 cm yang memiliki nilai penyerapan air paling tinggi terdapat pada variasi CT5ST5 dengan nilai penyerapan sebesar 10,53%, sedangkan variasi kontrol yaitu variasi CT0ST0 memiliki nilai penyerapan air paling rendah yaitu 8,5%. Dalam pengujian penyerapan air dilakukan proses sebanyak 4 variasi dengan masing masing 3 sampel, sehingga total seluruh benda uji sebanyak 12 sampel benda uji dengan ukuran 10 x 10 x 0,6 cm. Standar yang digunakan pada penelitian ini adalah SNI

01-4449-2006 yaitu nilai penyerapan air sebesar <35%. Secara keseluruhan setiap varian memiliki nilai penyerapan air yang berkisar antara 8,5% - 10,53%. Dimana nilai-nilai ini berada jauh dibawah batas mmaksimal yang ditetapkan SNI 01-4449-2006, yaitu sebesar <35%. Dengan demikian semua variasi plafon GRC dinyatakan layak dan memenuhi standar untuk diaplikasikan.

Berdasarkan **Gambar 4.2**, grafik hasil uji penyerapan air menunjukkan kenaikan daya serap air pada seluruh sampel yang menggunakan substitusi serbuk cangkang telur dan serat tebu jika dibandingkan dengan sampel kontrol CT0ST0 (8,50%). Peningkatan penyerapan air yang cukup signifikan pada sampel CT5ST5 (10,53%) disebabkan oleh karakteristik alami dari serat tebu yang bersifat hidrofilik dan memiliki struktur selulosa yang berpori, sehingga menyerap lebih banyak air ke dalam matriks komposit (Amin dkk., 2022). Di sisi lain, kehadiran serbuk cangkang telur sebagai substitusi semen berperan ganda; meskipun kalsium karbonat ($CaCO_3$) di dalamnya mempercepat reaksi hidrasi awal, penambahan material *bio waste non pozzolanik* dalam kondisi mentah cenderung meningkatkan volume pori mikro apabila tidak terdistribusi secara homogen, yang pada gilirannya mempermudah air meresap melalui aksi kapiler (Tangboriboon dkk., 2019). Namun, ketika persentase serat tebu terus ditingkatkan dari CT5ST5 menuju CT5ST10 (10,34%) hingga CT5ST15 (10,26%), grafik justru menunjukkan sedikit penurunan daya serap air secara bertahap, hal ini terjadi karena peningkatan densitas serat tebu yang padat karena penambahan jumlah seratnya, sehingga membatasi jalur penetrasi air bebas ke dalam sampel.

4.2.3 Uji Penyerapan Panas

Pengujian penyerapan panas pada penelitian ini dilakukan dengan memanaskan benda uji di dalam oven pada suhu 110°C selama 6 jam sebagai metode eksperimental yang dikembangkan peneliti untuk memberikan paparan panas secara seragam hingga benda uji mencapai kondisi termal yang relatif stabil. Suhu 110°C dipilih karena berada di atas suhu penguapan air bebas dalam pori material sehingga pengaruh kadar air terhadap hasil pengujian dapat diminimalkan,

sedangkan durasi pemanasan selama 6 jam ditetapkan agar distribusi panas pada seluruh bagian spesimen menjadi lebih merata. Dari data yang di dapatkan pada pengujian daya serap panas yang diperoleh pada setiap benda uji selanjutnya diolah untuk menentukan nilai rata-rata daya serap panas dari masing-masing variasi campuran. Data hasil pengujian daya serap panas disajikan pada **Tabel 4.8** berikut

Tabel 4.8 Hasil Uji Penyerapan Panas

Variasi	Kode Sampel	M (kg)	C (J/kg °C)	T2 (°C)	T1 (°C)	ΔT (T2 - T1)	Q (joule)	t (s)	$\hat{Q}$ (joule/s)	Laju Penyerapan Panas Rata-Rata
GRC A	A1	0,084	900	67,7	30,4	37,3	2843,38	21600	0,13	0,14
(CT0S	A2	0,099	900	61,6	30,6	31	2770,47	21600	0,13	
T0)	A3	0,098	900	72,1	30,3	41,8	3694,28	21600	0,17	
GRC B	B1	0,090	900	94	29,9	64,1	5192,10	21600	0,24	0,23
(CT5S	B2	0,101	900	86,6	30,4	56,2	5113,64	21600	0,24	
T5)	B3	0,091	900	83,1	30,5	52,6	4293,74	21600	0,20	
GRC C	C1	0,095	900	93,6	29,3	64,3	5497,65	21600	0,25	0,25
(CT5S	C2	0,087	900	93,6	29,4	64,2	5061,53	21600	0,23	
T10)	C3	0,102	900	93,5	30,4	63,1	5820,98	21600	0,27	
GRC D	D1	0,092	900	95,5	31,6	63,9	5313,92	21600	0,25	0,24
(CT5S	D2	0,095	900	93,5	31,5	62	5278,68	21600	0,24	
T15)	D3	0,099	900	87,8	31,6	56,2	4992,25	21600	0,23	

Keterangan:

Q = panas yang diserap (Joule)

M = massa panel (kg)

C = kalor jenis material (J/kg°C)

T1 = suhu awal (°C)

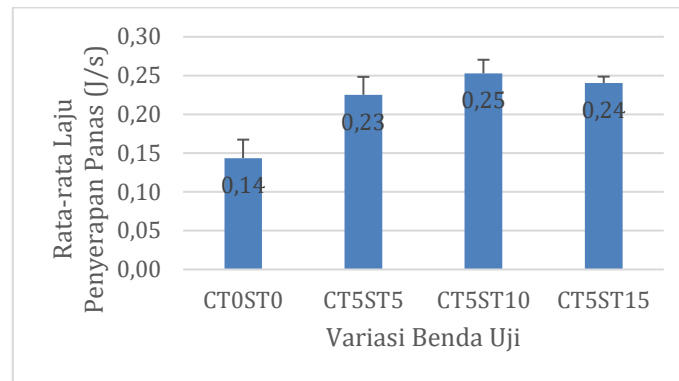
T2 = suhu akhir setelah oven (°C)

$\hat{Q}$ = Laju penyerapan panas (J/s)

t = waktu pengujian (21.600 s)

Variasi Terendah = 

Variasi Terbaik = 



Gambar 4.3 Grafik Uji Penyerapan Panas

Pada pengujian laju penyerapan panas, varian kontrol A menunjukkan laju terendah sebesar 0,14 J/s. Setelah disubstitusi dengan serat tebu dan 5% serbuk cangkang telur, laju penyerapan panas meningkat menjadi 0,23 J/s pada Varian B dan mencapai puncaknya di angka 0,25 J/s pada Varian C, sebelum akhirnya melandai ke 0,24 J/s pada Varian D.

Meskipun secara teoritis selulosa dan silika pada serat tebu memiliki kapasitas panas spesifik yang baik untuk menyimpan energi, peningkatan laju penyerapan panas pada grafik terjadi karena kehadiran serat tebu dan serbuk cangkang telur menjadi *filler*. Ketika serat tebu dimasukkan ke dalam campuran, orientasi serat yang tidak teratur dan interaksi antarmuka (*interface*) yang kurang sempurna dengan semen menciptakan banyak rongga udara mikro serta pori kapiler (Amin et al., 2022). Rongga-rongga udara dan fase mineral non-pozzolanik dari cangkang telur ini bertindak sebagai jembatan termal (*thermal bridges*) di mana radiasi dan konveksi panas di dalam pori mikro justru mempercepat perambatan energi termal, alih-alih menahannya (Tangboriboon dkk., 2019). Akibatnya, pada kadar serat CT5ST5 hingga CT5ST10, panas diserap dan dialirkan jauh lebih cepat melalui jaringan pori tersebut; efek isolasi termal dari selulosa baru mulai sedikit bekerja dan menahan laju panas saat densitas serat sangat tinggi (seperti pada penurunan di CT5ST15) di mana distribusi serat yang semakin rapat menyebabkan penyempurnaan struktur pori.

Berdasarkan standar SNI 6389:2020 (Konservasi Energi Selubung Bangunan), nilai laju yang berada di kisaran 0,23–0,25 J/s (Watt) ini masih tergolong efisien

untuk diaplikasikan sebagai plafon pelindung ruangan. Berdasarkan standar SNI 6389:2020 mengenai Konservasi Energi Selubung Bangunan pada Bangunan Gedung, parameter termal selubung atap dan plafon dibatasi melalui nilai perpindahan kalor maksimum sebesar 35 W/m^2 (atau 35 J/s). Hasil pengujian pada penelitian ini menunjukkan laju rata-rata penyerapan panas tiap varian berada pada rentang $0,14 \text{ J/s}$ hingga $0,25 \text{ J/s}$. Mengingat nilai laju penyerapan energi termal pada seluruh varian (A, B, C, dan D) sangat kecil dan berada jauh di bawah ambang batas maksimal mutu komposit hemat energi, maka plafon GRC dengan substitusi serat tebu dan serbuk cangkang telur ini dinyatakan memenuhi standar selubung bangunan yang efisien serta layak digunakan sebagai isolator termal pada ruangan.

4.2.4 Uji Ketahanan Terhadap Api

Pada pengujian ketahanan terhadap api, dilakukan dengan menaruh benda uji langsung diatas kompor sehingga terpapar langsung dengan api. Dilakukan pembakaran selama 5 menit untuk mengetahui ketahanan benda uji ketika menerima suhu tinggi secara langsung. Pengelompokkan data kualitatif berupa kerusakan visual (deformasi dan keretakan) selama pengujian ketahanan api berlangsung, penelitian ini menerapkan metode skoring dengan rentang nilai 1 sampai 4. Tingkatan skor ini disusun dengan mengadopsi dan memodifikasi batasan fungsional dari SNI 1741:2008 (Cara uji ketahanan api komponen struktur bangunan), terkhusus pada aspek penilaian integritas dan kriteria insulasi. Data pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.9** di bawah ini.

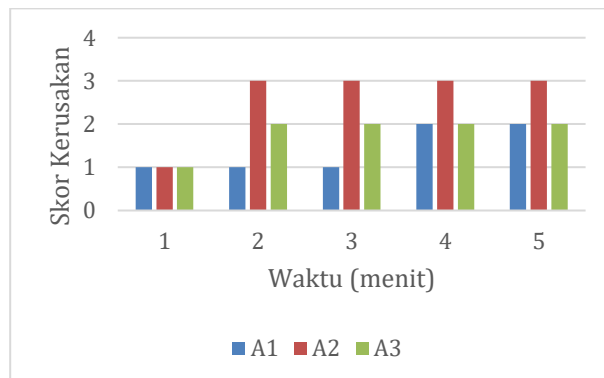
Tabel 4.9 Hasil Uji Ketahanan Terhadap Api

Variasi	Kode Sampel	Waktu (menit)					Kondisi Akhir
		1	2	3	4	5	
GRC A (CT0ST0)	A1	1	1	1	2	2	2
	A2	1	3	3	3	3	3
	A3	1	2	2	2	2	2
GRC B (CT5ST5)	B1	1	1	1	2	2	2
	B2	1	3	3	3	3	3
	B3	1	1	1	2	2	2
GRC C (CT5ST10)	C1	1	1	1	1	1	1
	C2	1	1	1	1	1	1
	C3	1	1	2	2	2	2

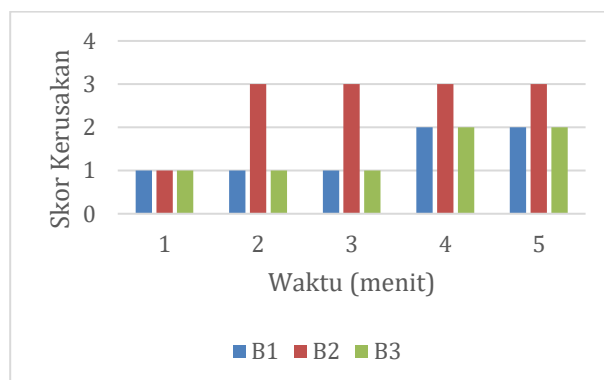
Variasi	Kode Sampel	Waktu (menit)					Kondisi Akhir
		1	2	3	4	5	
GRC D (CT5ST15)	D1	1	1	2	2	2	2
	D2	1	1	1	1	1	1
	D3	1	1	2	2	2	2

Keterangan skor:

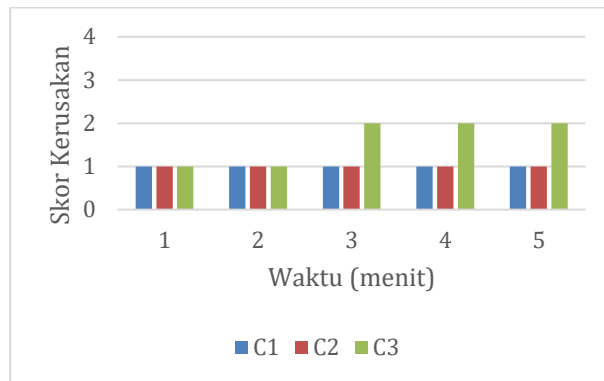
- Skor 1 (Kerusakan ringan) : Material hanya mengalami degradasi warna/termal tanpa cacat fisik.
- Skor 2 (Kerusakan sedang) : Inisiasi kegagalan fisik berupa retak rambut atau lendutan awal.
- Skor 3 (Kerusakan berat) : Munculnya retakan struktural yang dalam, terjadi pengelupasan lapisan permukaan skala besar (*spalling*), atau material mulai rapuh dan terkikis parah akibat panas kompor.
- Skor 4 (Kegagalan total) : Benda uji kehilangan integritas strukturnya secara penuh (api menembus celah atau meterial runtuh/hancur)



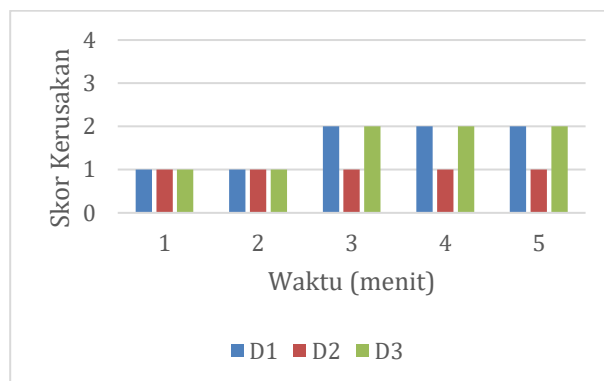
Gambar 4.4 Pengaruh Paparan Api GRC A (CT0ST0)



Gambar 4.5 Pengaruh Paparan Api GRC B (CT5ST5)



Gambar 4.6 Pengaruh Paparan Api GRC C (CT5ST10)



Gambar 4.7 Pengaruh Paparan Api GRC D (CT5ST15)

Berdasarkan hasil pengujian ketahanan terhadap api selama 5 menit menggunakan paparan langsung dari kompor gas, seluruh variasi plafon GRC tidak mengalami kegagalan total (skor 4). Hal ini menunjukkan bahwa seluruh benda uji masih mampu mempertahankan integritas strukturnya selama durasi pembakaran. Namun demikian, tingkat kerusakan yang terjadi berbeda pada setiap variasi campuran maupun antar sampel dalam variasi yang sama.

Variasi GRC A (CT0ST0) sebagai campuran kontrol menunjukkan tingkat kerusakan paling tinggi. Pada **Gambar 4.4** sampel A2 telah mencapai skor 3 (kerusakan berat) sejak menit ke-2 dan bertahan hingga akhir pengujian, sedangkan A1 dan A3 hanya mencapai skor 2. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa material tanpa substitusi serat tebu dan cangkang telur lebih cepat mengalami retak struktural serta degradasi akibat paparan panas yang terus-menerus. Pada temperatur tinggi, air bebas dan air terikat di dalam pasta semen akan menguap

sehingga meningkatkan tekanan uap di dalam pori-pori. Bersamaan dengan itu, dehidrasi produk hidrasi semen (C-S-H dan Ca(OH)_2) menyebabkan terbentuknya mikroretak yang kemudian berkembang menjadi retakan yang lebih besar apabila pemanasan berlangsung terus-menerus (Khoury, 2000; Kodur, 2014).

Variasi GRC B (CT5ST5) memperlihatkan pola kerusakan yang hampir sama dengan GRC A. Pada **Gambar 4.5** sampel B2 mencapai skor 3 sejak menit ke-2, sedangkan B1 dan B3 hanya mengalami kerusakan sedang (skor 2). Hal ini menunjukkan bahwa penambahan 5% serat tebu dan 5% cangkang telur belum mampu secara konsisten meningkatkan ketahanan terhadap api pada seluruh benda uji.

Sebaliknya, variasi GRC C (CT5ST10) pada **Gambar 4.6** menunjukkan performa terbaik. Sampel C1 dan C2 tetap berada pada skor 1 selama lima menit, yang berarti hanya mengalami perubahan warna akibat panas tanpa kerusakan fisik. Sampel C3 baru mengalami peningkatan menjadi skor 2 mulai menit ke-3. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi 5% serat tebu dan 10% cangkang telur memberikan ketahanan termal yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya. Serbuk cangkang telur yang kaya kalsium karbonat (CaCO_3) berperan sebagai filler sehingga mampu memperbaiki kepadatan mikrostruktur dan mengurangi jalur rambatan panas melalui pori-pori. Selain itu, distribusi serat tebu yang baik dapat membantu menghambat propagasi retak awal sehingga kerusakan berkembang lebih lambat (Benmansour et al., 2014; Amu et al., 2005).

Pada **Gambar 4.7** GRC D (CT5ST15), dua sampel (D1 dan D3) mengalami kerusakan sedang (skor 2), sedangkan D2 tetap berada pada skor 1 hingga akhir pengujian. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan substitusi cangkang telur menjadi 15% tidak selalu meningkatkan ketahanan api. Penggunaan cangkang telur yang terlalu tinggi dapat mengurangi jumlah semen aktif sehingga proses hidrasi tidak berlangsung optimal dan ikatan antarpartikel menjadi lebih lemah. Akibatnya, beberapa benda uji menjadi lebih rentan terhadap pembentukan retak saat menerima beban termal.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi GRC C (CT5ST10) memiliki ketahanan terhadap api terbaik karena mayoritas sampelnya

hanya mengalami kerusakan ringan selama lima menit pembakaran. Sebaliknya, GRC A dan GRC B menunjukkan kerusakan paling cepat dengan munculnya retak struktural pada salah satu sampel sejak menit ke-2. Tidak adanya sampel yang mencapai skor 4 menunjukkan bahwa seluruh panel masih mampu mempertahankan integritas struktur selama waktu pengujian sehingga belum mengalami keruntuhan total.

4.2.5 Uji Kerapatan

Melalui uji kerapatan yang telah dilakukan, maka diperoleh data untuk digunakan dalam perhitungan mencari nilai kerapatan. Berikut tabel data hasil uji dan perhitungan masing-masing sampel uji.

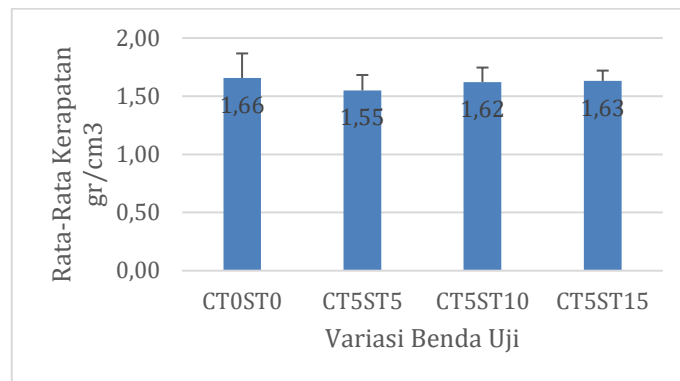
Tabel 4.10 Hasil Uji Kerapatan

Variasi	Kode Sampel	Massa (gr)	Volume (cm3)	Kerapatan (gr/cm3)	Rata-Rata Kerapatan (gr/cm3)	Nilai Minimal SNI 01-4449-2006
GRC A (CT0ST0)	A1	110	60	1,83	1,66	>0,84 gr/cm3
	A2	102,8	60	1,71		
	A3	85,4	60	1,42		
GRC B (CT5ST5)	B1	84,9	60	1,42	1,55	
	B2	93	60	1,55		
	B3	100,9	60	1,68		
GRC C (CT5ST10)	C1	90,8	60	1,51	1,62	
	C2	95,5	60	1,59		
	C3	105,5	60	1,76		
GRC D (CT5ST15)	D1	100	60	1,67	1,63	
	D2	91,8	60	1,53		
	D3	101,8	60	1,70		

Keterangan:

Variasi Terendah = 

Variasi Terbaik = 



Gambar 4.8 Grafik Uji Kerapatan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kerapatan pada papan GRC mengalami perubahan yang dinamis seiring dengan variasi persentase substitusi bahan. Varian CT0ST0 mencatatkan nilai kerapatan tertinggi sebesar $1,66 \text{ g/cm}^3$ berkat homogenitas matriks semen dan *fiberglass* murni yang minim rongga. Ketika dilakukan substitusi pada CT5ST5, nilai kerapatan mengalami penurunan tajam menjadi $1,55 \text{ g/cm}^3$, yang mengindikasikan bahwa serat alam yang kaku dan tidak seragam pada konsentrasi rendah cenderung mengganggu ikatan partikel semen serta memicu terbentuknya rongga udara mikroskopis (*void*). Namun, seiring meningkatnya fraksi volume serat pada CT5ST10 dan CT5ST15, nilai kerapatan merangkak naik kembali secara bertahap menuju $1,62 \text{ g/cm}^3$ dan $1,63 \text{ g/cm}^3$. Kenaikan ini membuktikan adanya efek *interlocking* antar-serat yang saling mengunci, didukung oleh peran kalsium karbonat (CaCO_3) dari serbuk cangkang telur yang bertindak sebagai *micro-filler* untuk menyumbat ruang kosong tersebut, sehingga menghasilkan struktur komposit yang kembali padat dan kompak (Amin et al., 2022).

4.2.6 Analisis Rancangan Anggaran Biaya Pembuatan Plafon

Dalam penelitian ini juga menganalisa perbandingan *cost* antara plafon konvensional dengan plafon inovasi substitusi serat tebu dan cangkang telur. Dengan membandingkan dari biaya produksinya maka dapat diketahui jumlah *cost* pembuatan antara kedua jenis plafon tersebut. Analisis hanya mencakup biaya

material, tanpa biaya upah tenaga kerja, penggunaan alat, dan biaya operasional. Analisis ini digunakan untuk mengetahui efisiensi biaya produksi dari masing-masing variasi. Adapun survei yang dilakukan untuk mengetahui setiap material yang digunakan sehingga analisis biaya yang diperoleh akan lebih aktual dengan kondisi di lapangan. Material yang disurvei meliputi pasir, semen, dan *fiberglass*. Harga yang telah disurvei ditunjukkan pada **Tabel 4.11**.

Tabel 4.11 Survey Jenis Pasir

No	Sumber Material	Alamat	Jenis Pasir
1.	Pasir, semen, dan <i>fiberglass</i> Tb. Lewi	Jl. Banjarsari No.16 B, Pedalangan, Kec. Banyumanik, Kota Semarang, Jawa Tengah, 50268	Pasir Merapi
2.	Pasir, semen, dan <i>fiberglass</i> Tb. Lancar	Jl. KH. Sirojudin No.3, Tembalang, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah, 50275	Pasir Merapi
3.	Pasir, semen, dan <i>fiberglass</i> Tb. Baru Makmur	Jl. Durian raya No. 45, Srandol Wetan, Kec Banyumanik, Kota Semarang, Jawa Tengah, 50263	Pasir Muntilan
4.	Pasir, semen, dan <i>fiberglass</i> Tb. Beton Jaya Lestari	Jl. Mulawarman Selatan Raya No.77A, Kramas, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50266	Pasir Muntilan
5.	Pasir, semen, dan <i>fiberglass</i> Tb. Sumber Rejeki	Jl. Ngesrep Timur. V No.6, Sumurboto, Kec. Banyumanik, Kota Semarang, Jawa Tengah 50269	Pasir Muntilan

Kebutuhan banyaknya material dihitung per 1 m² dengan ukuran 1 palfond yaitu 10x10 cm yaitu 100 cm². Kebutuhan per 1 m² yaitu: $\frac{10.000}{100} = 100$ buah/m².

Harga satuan biaya disusun berdasarkan data yang diperoleh dari hasil survei lapangan pada **Tabel 4.11**. Berikut merupakan rincian perbandingan *cost* pembuatan tiap variasi:

1. Plafon Variasi CT0ST0

Pada variasi plafon CT0ST0 digunakan sebagai kontrol atau variasi normal dengan komposisi semen 100%, serat tebu sebesar 0%, dan penambahan serbuk cangkang telur sebesar 0%. Berikut merupakan analisis biaya pembuatan plafon variasi CT0ST0 yang ditunjukkan pada **Tabel 4.12**.

Tabel 4. 12 Rincian Biaya Material Plafon Variasi CT0ST0

No	Material	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Semen (Kotak)	0,04597	Kg	1.200,00	55,16
2	Pasir (Kotak)	0,04597	Kg	1.250,00	57,46
3	<i>Fiberglass</i> (Kotak)	1,38000	Gram	250,00	345,00
4	Cangkang Telur	0,00000	Gram	8,80	0,00
5	Serat Tebu	0,00000	Gram	0,00	0,00
Total Biaya 10x10x0,6 (1 Buah)					457,63
Total Biaya 20x10x0,6 (1 Buah)					915,25

2. Plafon Variasi CT5ST5

Pada variasi plafon CT5ST5 digunakan sebagai variasi inovasi dengan komposisi substitusi serat tebu sebesar 5% dan penambahan serbuk cangkang telur sebesar 5%. Berikut merupakan analisis biaya pembuatan plafon variasi CT5ST5 yang ditunjukkan pada **Tabel 4.13**.

Tabel 4.13 Rincian Biaya Material Plafon Variasi CT5ST5

No	Material	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Semen (Kotak)	0,04367	Kg	1.200,00	52,40
2	Pasir (Kotak)	0,04597	Kg	1.250,00	57,46
3	<i>Fiberglass</i> (Kotak)	1,31000	Gram	250,00	327,50
4	Cangkang Telur	2,30000	Gram	8,80	20,24
5	Serat Tebu	-	Gram	0,00	0,00
Total Biaya 10x10x0,6 (1 Buah)					457,61
Total Biaya 20x10x0,6 (1 Buah)					915,21

3. Plafon Variasi CT5ST10

Pada variasi plafon CT5ST10 digunakan sebagai variasi inovasi dengan komposisi substitusi serat tebu sebesar 10% dan penambahan serbuk cangkang telur sebesar 5%. Berikut merupakan analisis biaya pembuatan plafon variasi CT5ST10 yang ditunjukkan pada **Tabel 4.14**.

Tabel 4.14 Rincian Biaya Material Plafon Variasi CT5ST10

No	Material	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Semen (Kotak)	0,04367	Kg	1.200,00	52,40
2	Pasir (Kotak)	0,04597	Kg	1.250,00	57,46

No	Material	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
3	<i>Fiberglass</i> (Kotak)	1,24000	Gram	250,00	310,00
4	Cangkang Telur	2,30000	Gram	8,80	20,24
5	Serat Tebu	-	Gram	0,00	0,00
Total Biaya 10x10x0,6 (1 Buah)					440,11
Total Biaya 20x10x0,6 (1 Buah)					880,21

4. Plafon Variasi CT5ST15

Pada variasi plafon CT5ST15 digunakan sebagai variasi inovasi dengan komposisi substitusi serat tebu sebesar 15% dan penambahan serbuk cangkang telur sebesar 5%. Berikut merupakan analisis biaya pembuatan plafon variasi CT5ST15 yang ditunjukkan pada **Tabel 4.15**.

Tabel 4.15 Rincian Biaya Material Plafon Variasi CT5ST15

No	Material	Volume	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Semen (Kotak)	0,04367	Kg	1.200,00	52,40
2	Pasir (Kotak)	0,04597	Kg	1.250,00	57,46
3	<i>Fiberglass</i> (Kotak)	1,17000	Gram	250,00	292,50
4	Cangkang Telur	2,30000	Gram	8,80	20,24
5	Serat Tebu	-	Gram	0,00	0,00
Total Biaya 10x10x0,6 (1 Buah)					422,61
Total Biaya 20x10x0,6 (1 Buah)					845,21

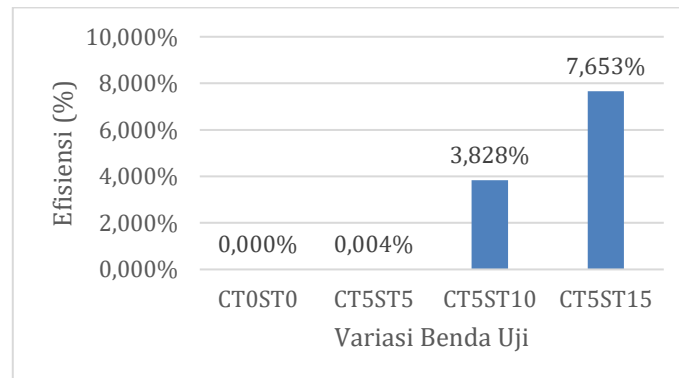
Berdasarkan hasil rincian anggaran biaya (RAB) dari masing-masing variasi campuran plafon inovasi, maka dilakukan analisis perbandingan nilai ekonomis terhadap variasi kontrol (CT0ST0). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui besaran penghematan (selisih biaya) dan nilai efisiensi yang didapatkan dari substitusi serat tebu dan penambahan serbuk cangkang telur. Hasil analisis selisih biaya dan efisiensi untuk cetakan jenis kotak dan jenis lentur dijabarkan berturut-turut pada **Tabel 4.16** dan **Tabel 4.17**.

Tabel 4.16 Hasil Analisis Selisih Biaya dan Efisiensi Plafon 10x10x0,6

No	Variasi Plafon	Total Biaya (Rp)	Kontrol	Selisih Biaya Hemat (Rp)	Persentase Efisiensi (%)
1	CT0ST0	457,63	457,63	0,00 (Acuan)	0,000%
2	CT5ST5	457,61	457,63	0,02	0,004%
3	CT5ST10	440,11	457,63	17,52	3,828%
4	CT5ST15	422,61	457,63	35,02	7,652%

Tabel 4.17 Hasil Analisis Selisih Biaya dan Efisiensi Plafon 20x10x0,6

No	Variasi Plafon	Total Biaya (Rp)	Kontrol	Selisih Biaya Hemat (Rp)	Persentase Efisiensi (%)
1	CT0ST0	915,25	915,25	0,00 (Acuan)	0,000%
2	CT5ST5	915,21	915,25	0,04	0,004%
3	CT5ST10	880,21	915,25	35,04	3,828%
4	CT5ST15	845,21	915,25	70,04	7,652%

**Gambar 4.9** Grafik Efisiensi Pembuatan GRC

Berdasarkan analisis rincian anggaran biaya (RAB) dan nilai ekonomis dari keempat variasi GRC, dapat disimpulkan bahwa peningkatan persentase substitusi serat tebu berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi biaya produksi, di mana variasi CT5ST15 terbukti menjadi variasi paling optimal dengan tingkat efisiensi tertinggi mencapai 7,652%. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan biaya produksi dari variasi kontrol CT0ST0 yang semula sebesar Rp457,63 menjadi Rp422,61 pada benda uji ukuran 10x10x0,6 cm (menghemat Rp35,02), serta dari Rp915,25 menjadi Rp845,21 pada jenis lentur (menghemat Rp70,04). Sebaliknya, variasi CT5ST5 hampir tidak memberikan dampak ekonomis karena hanya menghasilkan efisiensi minimal sebesar 0,004%, sementara variasi CT5ST10 mulai menunjukkan penghematan moderat sebesar 3,828% pada kedua jenis cetakan. Dengan demikian, pemanfaatan limbah serat tebu hingga kadar 15% sangat direkomendasikan sebagai solusi substitusi bahan baku *fiberglass* yang efektif untuk menekan biaya produksi plafon GRC secara berkelanjutan.

4.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian

Pada bagian ini, semua hasil pengujian dari empat variasi plafon GRC dirangkum menjadi satu tabel agar kita bisa melihat langsung bagaimana penambahan serat tebu dan serbuk cangkang telur memengaruhi semua sifat plafon secara bersamaan, mulai dari kekuatannya saat ditumpu (kuat lentur), sifat fisiknya (berat dan daya serap air), ketahanannya saat dibakar (uji panas dan api), hingga dari segi hematnya biaya produksi. Adapun rekap hasil pengujian disajikan pada **Tabel 4.18** di bawah ini:

Tabel 4.18 Rekap Hasil Pengujian

Variasi	Jenis Pengujian					Efisiensi biaya (%)
	Uji Lentur (Kgf/cm ²)	Uji Penyerapan Air (%)	Uji Penyerapan Panas (joule/s)	Uji Ketahanan Terhadap Api (skor)	Uji Kerapatan (gr/cm ³)	
CT0ST0	95,60	8,5	0,14	3	1,66	0,000%
CT5ST5	112,59	10,53	0,23	3	1,55	0,004%
CT5ST10	97,72	10,34	0,25	2	1,62	3,828%
CT5ST15	110,47	10,26	0,24	2	1,63	7,652%

Berdasarkan rekapitulasi hasil pengujian pada **Tabel 4.18**, dapat disimpulkan bahwa substitusi serat tebu dan serbuk cangkang telur memberikan pengaruh yang berbeda terhadap setiap parameter kinerja material plafon GRC. Penambahan kedua bahan limbah tersebut terbukti mampu meningkatkan beberapa sifat tertentu, seperti kuat lentur, ketahanan terhadap api, dan efisiensi biaya, namun di sisi lain menyebabkan penurunan pada beberapa karakteristik fisik, terutama penyerapan air, penyerapan panas, dan kerapatan. Dengan demikian, tidak terdapat satu variasi substitusi yang menunjukkan performa terbaik pada seluruh parameter pengujian secara bersamaan.

Pada parameter kuat lentur, variasi CT5ST5 menghasilkan nilai tertinggi sebesar 112,59 kgf/cm², diikuti oleh variasi CT5ST15 sebesar 110,47 kgf/cm². Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan serat tebu dan serbuk cangkang telur dalam jumlah tertentu masih mampu meningkatkan kemampuan material dalam menahan beban lentur. Namun demikian, peningkatan kuat lentur tersebut diikuti oleh meningkatnya nilai penyerapan air menjadi 10,53% serta menurunnya kerapatan

menjadi $1,55 \text{ gr/cm}^3$, yang mengindikasikan terbentuknya porositas internal yang lebih besar dibandingkan variasi kontrol.

Pada pengujian ketahanan terhadap api, variasi CT5ST10 dan CT5ST15 menunjukkan performa terbaik dengan skor kerusakan 2, yang berarti material hanya mengalami kerusakan sedang berupa retak awal tanpa mengalami kegagalan struktural. Selain itu, dari aspek ekonomi, variasi CT5ST15 memberikan efisiensi biaya produksi tertinggi sebesar 7,652% karena adanya pengurangan penggunaan semen melalui pemanfaatan limbah cangkang telur dan serat tebu. Meskipun demikian, variasi tersebut tetap menunjukkan peningkatan penyerapan air dan penyerapan panas dibandingkan variasi kontrol.

Hubungan antara hasil uji kerapatan, penyerapan air, dan penyerapan panas menunjukkan kecenderungan yang saling berkaitan. Penurunan nilai kerapatan dari $1,66 \text{ gr/cm}^3$ pada variasi kontrol menjadi $1,55 \text{ gr/cm}^3$ pada variasi CT5ST5 mengindikasikan meningkatnya porositas akibat penambahan serat tebu yang memiliki massa jenis rendah serta terbentuknya rongga pada zona antarmuka antara serat dan pasta semen. Peningkatan porositas tersebut menyebabkan air lebih mudah masuk melalui mekanisme kapiler sehingga nilai penyerapan air meningkat. Pada saat yang sama, keberadaan rongga udara di dalam material juga mempercepat perpindahan panas sehingga laju penyerapan panas meningkat dibandingkan variasi kontrol. Ketika persentase cangkang telur ditingkatkan pada variasi CT5ST10 dan CT5ST15, sebagian pori mulai terisi oleh partikel halus cangkang telur (*filler effect*) sehingga nilai kerapatan kembali meningkat menjadi $1,62\text{--}1,63 \text{ gr/cm}^3$, diikuti oleh sedikit penurunan nilai penyerapan air dan kecenderungan stabilnya laju penyerapan panas. Fenomena ini menunjukkan bahwa perubahan porositas mikrostruktur merupakan faktor utama yang mengendalikan ketiga parameter tersebut (Amin et al., 2022; Tangboriboon et al., 2019).

Meskipun beberapa variasi substitusi memberikan keunggulan pada parameter tertentu, berdasarkan evaluasi seluruh hasil pengujian, variasi kontrol (CT0ST0) merupakan variasi yang paling optimal secara keseluruhan. Variasi ini memiliki nilai penyerapan air terendah (8,5%), laju penyerapan panas paling rendah ($0,14 \text{ J/s}$), serta kerapatan tertinggi ($1,66 \text{ gr/cm}^3$) yang menunjukkan mikrostruktur paling

rapat dan stabil. Selain itu, meskipun nilai kuat lenturnya ($95,60 \text{ kgf/cm}^2$) lebih rendah dibandingkan beberapa variasi substitusi, nilainya masih memenuhi kebutuhan fungsional material plafon GRC dan tetap menunjukkan ketahanan terhadap api yang baik tanpa mengalami kegagalan total selama pengujian. Oleh karena itu, apabila seluruh parameter teknis dipertimbangkan secara bersamaan, variasi kontrol memberikan keseimbangan performa yang paling baik dibandingkan variasi dengan substitusi serat tebu dan serbuk cangkang telur.

Dengan demikian, pemanfaatan serat tebu dan serbuk cangkang telur memiliki potensi sebagai material alternatif ramah lingkungan dan mampu meningkatkan sifat tertentu, terutama kuat lentur, ketahanan terhadap api, serta efisiensi biaya produksi. Namun, berdasarkan hasil penelitian ini, substitusi tersebut juga meningkatkan porositas yang berdampak pada kenaikan penyerapan air dan penyerapan panas. Oleh sebab itu, variasi kontrol (CT0ST0) tetap menjadi komposisi yang paling optimal secara keseluruhan