



BAB IV
PEMBAHASAN

BAB IV

HASIL DAN 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 Kumulatif (%)	Berat lolos saringan kumulatif (%)
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%		

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

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

$$\text{FM} = \frac{\text{Jumlah sisa diatas saringan 0,150}}{100}$$

$$= \frac{303,94}{100}$$

$$= 3,04 \text{ (kasar)}$$

Hasil klasifikasi jenis pasir berdasarkan nilai modulus kehalusan agregat halus disajikan pada **Tabel 4.2**.

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

$$\text{Kandungan lumpur} = \frac{9}{239} \times 100 \%$$

$$= 3,76 \%$$

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 Ikut 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 Ikut 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 Ikut Semen Substitusi Cangkang Telur 5%

Pengujian ikat semen yang disubstitusi serbuk cangkang telur 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 (Rabiu, 2009). Menurut Shiferaw dkk. (2019), serbuk cangkang telur yang berukuran halus dapat berperan sebagai media nukleasi bagi produk-produk hidrasi semen. Keberadaan permukaan partikel tersebut membantu pengendapan produk hidrasi berlangsung lebih cepat, sehingga laju reaksi hidrasi semen meningkat. Selain pengaruh fisik tersebut, kandungan kalsium karbonat (CaCO_3) pada serbuk cangkang telur dapat berinteraksi dengan trikalsium aluminat (C_3A) dalam semen Portland dan mengubah komposisi produk hidrasi.

Kondisi ini menunjukkan bahwa serbuk cangkang telur dapat mempercepat reaksi hidrasi melalui efek nukleasi sekaligus reaksi karbonat–aluminat. 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

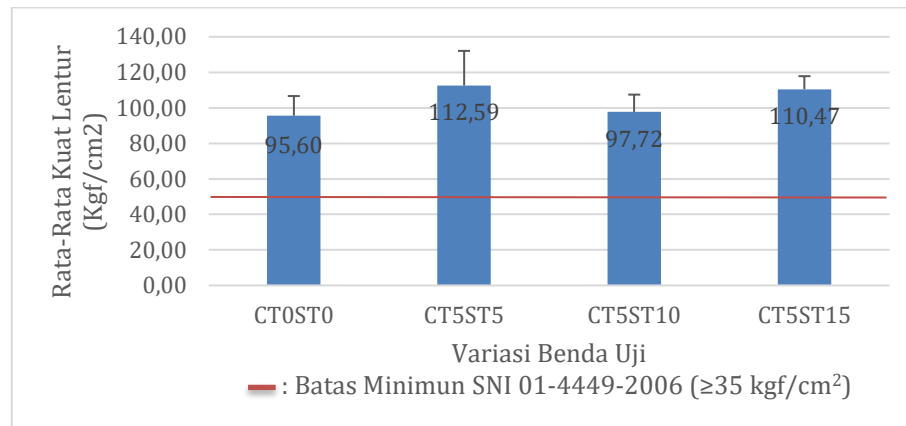
Variasi	Kode	lebar (cm)	tebal (cm)	jarak sanggah (cm)	Beban Maksi mal Spesi men (kN)	Beban Maksi mal Spesim en (Kgf)	Kuat Lentur (Kgf/c m2)	Rata- rata (Kgf/ cm2)	Standar SNI 01- 4449- 2006			
GRC A (CT0ST0)	A1	10	0,6	15	0,13	13,26	82,85	95,60	≥35 kgf/cm ²			
	A2	10	0,6	15	0,16	16,32	101,97					
	A3	10	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		≥35 kgf/cm ²		
	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			≥35 kgf/cm ²	
	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				≥35 kgf/cm ²
	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 = 

Hasil pengujian kuat lentur tiap variasi benda uji disajikan dalam tabel, kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk mengetahui pengaruh variasi substitusi serat tebu dan cangkang telur pada **Gambar 4.1**.



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 ≥ 35 kgf/cm², sehingga berdasarkan hasil pengujian kuat lentur, seluruh variasi memenuhi persyaratan minimum kuat lentur berdasarkan SNI 01-4449-2006. Varian kontrol A (CT0ST0) mencatatkan nilai rata-rata kuat lentur terendah sebesar 95,60 kgf/cm² 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 kgf/cm².

Peningkatan kinerja lentur beton dengan penambahan serat tebu terjadi karena serat membentuk mekanisme *bridging effect* pada bidang retak. Ketika retak mikro mulai muncul akibat tegangan tarik, serat yang melintasi retak membantu menurunkan konsentrasi tegangan pada ujung retak dan menahan perambatan retak melalui deformasi, proses *pull-out*, atau putusnya serat (Zhong dkk., 2026). Meskipun pada Varian C (CT5ST10) nilai kuat lenturnya sempat mengalami reduksi menjadi 97,72 kgf/cm² akibat jumlah serat yang sebarannya kurang merata, nilai tersebut kembali naik pada Varian D (CT5ST15) menjadi 110,47 kgf/cm² seiring dengan terbentuknya susunan serat yang semakin padat dan kokoh dalam menahan beban lentur maksimal.



Gambar 4.2 Pengujian Kuat Lentur

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	Kod e Sam pel	MK (gr)	MB (gr)	Penyerapan Air (%)	Rata- Rata Penyera pan Air (%)	Nilai Maksimum SNI 01- 4449-2006	Status			
GRC A (CT0ST0)	A1	102,8	112,9	9,82	8,5	<35%	Memenuhi			
	A2	102,8	110	7						
	A3	85,49	92,9	8,67						
GRC B (CT5ST5)	B1	84,9	93,8	10,48	10,53		<35%	Memenuhi		
	B2	93	102,4	10,11						
	B3	100,3	112	11						
GRC C (CT5ST10)	C1	90,8	100	10,13	10,34			<35%	Memenuhi	
	C2	95,5	105,4	10,37						
	C3	105,5	116,6	10,52						
GRC D (CT5ST15)	D1	100	110	10	10,26				<35%	Memenuhi
	D2	91,8	101,4	10,46						
	D3	101,8	112,3	10,31						

Keterangan:

Variasi Terendah = 

Variasi Terbaik = 

Nilai rata-rata penyerapan air didapat dari standar pengujian berdasarkan SNI 01-4449-2006 tentang papan serat dengan menggunakan rumus :

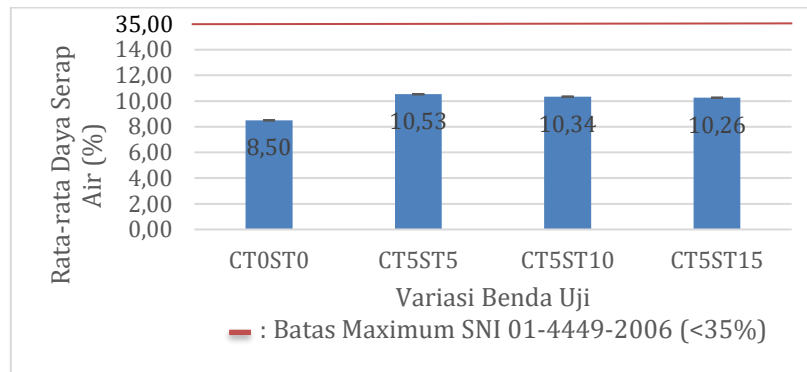
$$\text{Daya serap} = \frac{mb - mk}{mk} \times 100\% \dots \dots \dots \text{rumus}(2)$$

Keterangan:

mb = massa basah benda uji (gr)

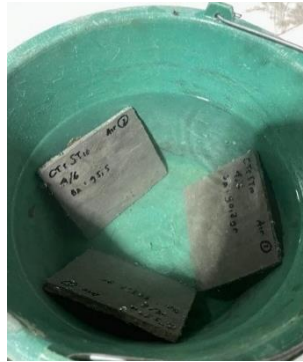
mk = massa kering benda uji (gr)

Perbandingan nilai rata-rata penyerapan air pada setiap variasi campuran disajikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 4.3**.



Gambar 4.3 Grafik Hasil Uji Penyerapan Air

Berdasarkan **Gambar 4.3** 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.



Gambar 4.4 Pengujian Penyerapan Air

Berdasarkan **Gambar 4.3**, 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%). Nilai penyerapan air sampel CT5ST5 sebesar 10,53% menunjukkan bahwa penambahan serat tebu meningkatkan kecenderungan komposit dalam menyerap air. Kondisi tersebut berkaitan dengan karakter hidrofilik serat tebu yang memiliki gugus hidroksil pada komponen lignoselulosanya, sehingga mampu membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air (Chen dkk., 2021).

Di sisi lain, serbuk cangkang telur sebagai substitusi parsial semen dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap struktur mikro campuran. Kandungan (CaCO_3) pada serbuk cangkang telur dapat menyediakan situs nukleasi dan mempercepat pembentukan produk hidrasi pada tahap awal. Namun, serbuk cangkang telur yang digunakan tanpa perlakuan termal intensif masih dapat mengandung material organik pada permukaannya, sehingga adsorpsi ion (Ca^{2+}) serta pertumbuhan C-S-H pada permukaan partikel dapat berlangsung kurang optimal. Apabila partikel tidak tersebar secara homogen, antarmuka antara partikel dan matriks berpotensi menjadi kurang padat serta membentuk jalur pori yang memudahkan masuknya air melalui mekanisme absorpsi kapiler (He dkk., 2022). 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

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)	T2 (°C)	T1 (°C)	ΔT (T2-T1)	Q (joule)	$\hat{Q}$ (joule/s)	Laju Penyerapan Panas Rata-Rata
GRC A (CT0ST0)	A1	0,084	67,7	30,4	37,3	2843,38	0,13	0,14
	A2	0,099	61,6	30,6	31	2770,47	0,13	
	A3	0,098	72,1	30,3	41,8	3694,28	0,17	
GRC B (CT5ST5)	B1	0,090	94	29,9	64,1	5192,10	0,24	0,23
	B2	0,101	86,6	30,4	56,2	5113,64	0,24	
	B3	0,091	83,1	30,5	52,6	4293,74	0,20	
GRC C (CT5ST10)	C1	0,095	93,6	29,3	64,3	5497,65	0,25	0,25
	C2	0,087	93,6	29,4	64,2	5061,53	0,23	
	C3	0,102	93,5	30,4	63,1	5820,98	0,27	
GRC D (CT5ST15)	D1	0,092	95,5	31,6	63,9	5313,92	0,25	0,24
	D2	0,095	93,5	31,5	62	5278,68	0,24	
	D3	0,099	87,8	31,6	56,2	4992,25	0,23	

Keterangan:

Variasi Terendah = 

Variasi Terbaik = 

Penyerapan panas pada penelitian ini akan diuji menggunakan metode oven, dengan menghitung panas yang diserap dengan rumus(3):

$$Q = m \cdot c \cdot (T2 - T1) \dots \dots \dots rumus(3)$$

Keterangan:

Q = panas yang diserap (Joule)

m = massa panel (kg)

c = kalor jenis material (900 J/kg°C)

T1 = suhu awal (°C)

T2 = suhu akhir setelah oven (°C)

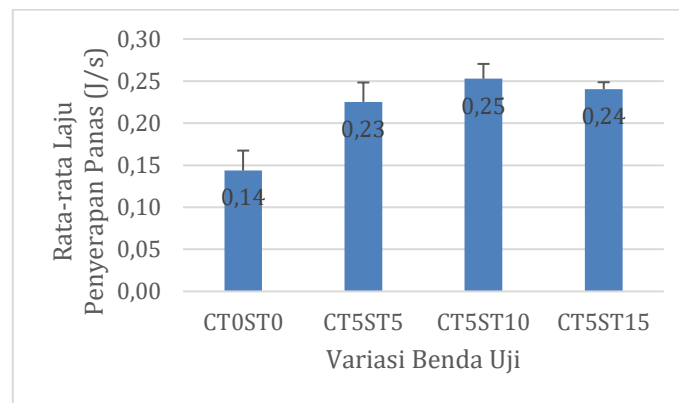
$$\hat{Q} = \frac{Q}{t} \dots \dots \dots rumus (4)$$

Keterangan:

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

t = waktu pengujian (21.600 s)

Perbandingan nilai rata-rata laju penyerapan panas pada setiap variasi campuran disajikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4. 5 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.

Penambahan serat tebu ke dalam campuran semen dapat memengaruhi struktur internal komposit melalui pembentukan zona transisi antarmuka antara serat dan matriks semen. Pada kadar serat yang terkontrol, serat diperkirakan dapat meningkatkan kemampuan matriks dalam menahan retak. Akan tetapi, penambahan serat yang berlebihan atau distribusi serat yang tidak merata berpotensi meningkatkan jumlah rongga dalam campuran dan mengganggu kontinuitas matriks semen (Mydin dkk., 2024). Rongga udara yang terbentuk akibat penambahan serbuk cangkang telur dapat memengaruhi respons termal komposit melalui perubahan porositas dan kesinambungan fase padat. Serbuk cangkang telur yang didominasi oleh (CaCO_3) memiliki reaktivitas lebih rendah daripada semen;

pada kadar substitusi yang tinggi, efek pengenceran semen berpotensi meningkatkan porositas dan mengurangi kerapatan matriks. Pori yang terisi udara umumnya memutus jalur konduksi pada fase padat sehingga cenderung menurunkan konduktivitas termal material (Abdellatief dkk., 2025). 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.



Gambar 4.6 Pengujian Penyerapan Panas

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/m² atau 35 J/s. Hasil pengujian pada penelitian ini menunjukkan laju rata-rata penyerapan panas tiap varian berada pada rentang 0,14 J/s hingga 0,25 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

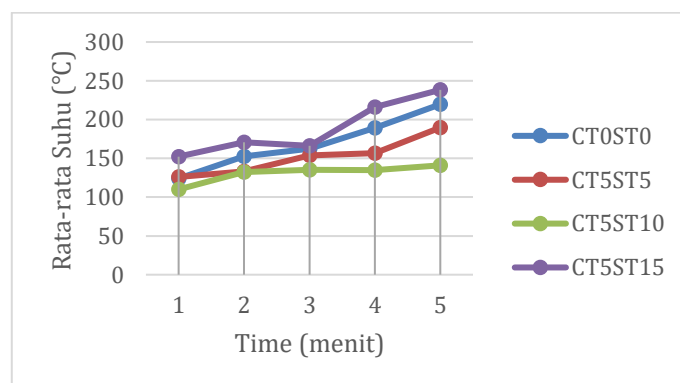
Variasi	Kode Sampel	Parameter	Menit 1	Menit 2	Menit 3	Menit 4	Menit 5	Kondisi Akhir
GRC A (CT0ST0)	A1	Suhu (°C)	137	143	184	221	229	2
		Deformasi/ Retak	1	1	1	2	2	
	A2	Suhu (°C)	125	170	152	198	263	3
		Deformasi/ Retak	1	3	3	3	3	
	A3	Suhu (°C)	110	145	152	149	167	2
		Deformasi/ Retak	1	2	2	2	2	
GRC B (CT5ST5)	B1	Suhu (°C)	126	132	163	156	201	2
		Deformasi/ Retak	1	1	1	2	2	
	B2	Suhu (°C)	140	136	154	162	197	3
		Deformasi/ Retak	1	3	3	3	3	
	B3	Suhu (°C)	112	132	144	152	171	2
		Deformasi/ Retak	1	1	1	2	2	
GRC C (CT5ST10)	C1	Suhu (°C)	111	141	144	132	139	1
		Deformasi/ Retak	1	1	1	1	1	
	C2	Suhu (°C)	121	135	128	133	140	1
		Deformasi/ Retak	1	1	1	1	1	
	C3	Suhu (°C)	98	121	134	140	144	2
		Deformasi/ Retak	1	1	2	2	2	
GRC D (CT5ST15)	D1	Suhu (°C)	166	215	158	192	222	2
		Deformasi/ Retak	1	1	2	2	2	

Variasi	Kode Sampel	Parameter	Menit 1	Menit 2	Menit 3	Menit 4	Menit 5	Kondisi Akhir
	D2	Suhu (°C)	186	181	195	285	220	1
		Deformasi/ Retak	1	1	1	1	1	
	D3	Suhu (°C)	105	116	145	171	273	2
		Deformasi/ Retak	1	1	2	2	2	

Keterangan skor:

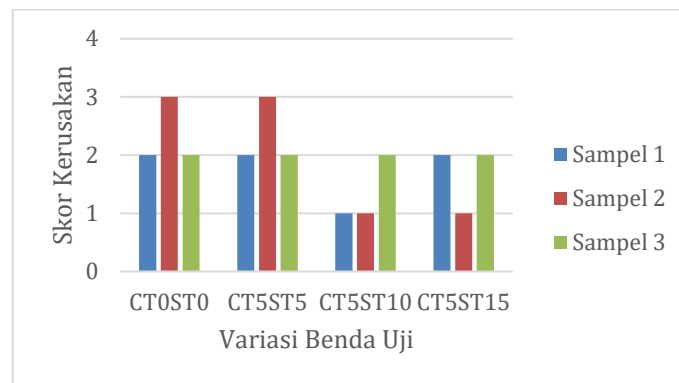
- a) Skor 1 (Kerusakan ringan) : Material hanya mengalami degradasi warna/termal tanpa cacat fisik.
- b) Skor 2 (Kerusakan sedang) : Inisiasi kegagalan fisik berupa retak rambut atau lendutan awal.
- c) Skor 3 (Kerusakan berat): Munculnya retakan struktural yang dalam, terjadi pengelupasan lapisan permukaan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

Perbandingan perubahan suhu pada setiap variasi benda uji selama pengujian ketahanan terhadap api disajikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7 Grafik Kenaikan Suhu Uji Ketahanan Api

Selain perubahan suhu selama pengujian, tingkat kerusakan visual pada setiap variasi benda uji juga diamati untuk mengetahui pengaruh substitusi serat tebu dan cangkang telur terhadap ketahanan material terhadap api. Data tingkat kerusakan tersebut disajikan pada **Gambar 4.8**.



Gambar 4.8 Grafik Tingkat Kerusakan

Berdasarkan hasil pengujian ketahanan api selama 5 menit dengan paparan api langsung menggunakan kompor yang metodenya disesuaikan dengan kondisi laboratorium namun tetap terinspirasi dari kriteria SNI 1741:2008 variasi substitusi serat tebu dan serbuk cangkang telur terbukti secara signifikan memengaruhi ketahanan termal serta integritas fisik plafon GRC. Data pada **Gambar 4.7** dan **Gambar 4.8** menunjukkan bahwa variasi CT0ST0 dan CT5ST15 memiliki kerentanan termal yang cukup tinggi, di mana sampel kontrol CT0ST0 mengalami kerusakan struktur berat akibat kejutan termal hingga mencapai Skor 3 pada menit ke-2 dengan rata-rata suhu akhir 219,67°C. Kenaikan suhu permukaan non-pembakaran pada sampel CT5ST15 hingga 273°C pada menit ke-5 dapat dikaitkan dengan tingginya kandungan selulosa organik pada serat tebu. Komponen lignoselulosa, khususnya selulosa, merupakan penyumbang utama degradasi termal pada serat alam dan umumnya mulai terdekomposisi secara menyeluruh pada rentang suhu 215–470°C, dengan hemiselulosa terdekomposisi lebih awal pada suhu maksimum sekitar 290°C. Semakin tinggi proporsi serat tebu dalam komposit, semakin besar pula kontribusi komponen organik yang mudah terdegradasi terhadap respons panas material (Nurazzi dkk., 2021).

Kestabilan suhu permukaan CT5ST10 pada kisaran 139–144°C serta rendahnya tingkat kerusakan visual menunjukkan bahwa formulasi tersebut memiliki kemampuan lebih baik dalam menunda *transfer* panas dibandingkan variasi substitusi lainnya. Serbuk cangkang telur yang kaya (CaCO_3) dapat berperan sebagai *filler* mineral dalam sistem penghambat api, sedangkan serat tebu menyumbang komponen lignoselulosa yang dapat mengalami karbonisasi. Studi

pada komposit serat alam menunjukkan bahwa serbuk cangkang telur dalam sistem *flame retardant* berpotensi meningkatkan waktu penyulutan dan menurunkan laju pembakaran serta pelepasan panas (Basnayake dkk., 2023)



Gambar 4.9 Pengujian Ketahanan Terhadap Api

4.2.5 Uji Kerapatan

Melalui uji kerapatan yang telah dilakukan, hasil pengujian kerapatan pada setiap variasi campuran plafon GRC disajikan pada **Tabel 4.10** untuk mengetahui perubahan nilai kerapatan akibat substitusi serat tebu dan serbuk cangkang telur.

Tabel 4. 10 Hasil Uji Kerapatan

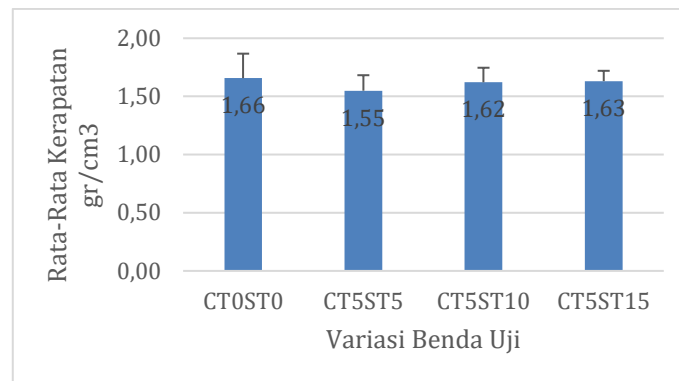
Variasi	Kode Sampel	Massa (gr)	Volume (cm3)	Kerapatan (gr/cm3)	Rata-Rata Kerapatan (gr/cm3)	Nilai Minimal SNI 01-4449-2006
GRC A (CT0ST0)	A1	110	60	1,83	1,66	>0,84 gr/cm3
	A2	102,8	60	1,71		
	A3	85,4	60	1,42		
GRC B (CT5ST5)	B1	84,9	60	1,42	1,55	
	B2	93	60	155		
	B3	100,9	60	1,68		
GRC C (CT5ST10)	C1	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 = 

Perbandingan nilai rata-rata kerapatan setiap variasi campuran disajikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4. 10 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*). Nilai kerapatan pada variasi CT5ST10 dan CT5ST15 meningkat secara bertahap hingga masing-masing mencapai $1,62 \text{ g/cm}^3$ dan $1,63 \text{ g/cm}^3$.

Kenaikan tersebut mengindikasikan bahwa pada peningkatan sifat mekanik pada komposit berbasis serat tebu dan serbuk cangkang telur menunjukkan bahwa komposisi penguat yang tepat mampu menghasilkan struktur material yang lebih kompak. Serat tebu berperan sebagai penguat alami yang membantu meneruskan beban melalui mekanisme transfer tegangan dari matriks menuju serat, sedangkan keberadaan serbuk cangkang telur membantu memperbaiki susunan internal komposit. Distribusi partikel cangkang telur yang lebih halus memungkinkan terbentuknya interaksi yang lebih baik antara fase penguat dan matriks sehingga rongga antar komponen dapat diminimalkan (Rangga dkk., 2022)

4.2.6 Analisa 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 Survei Toko Material

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

Kebutuhan banyaknya material dihitung per 1 m² dengan ukuran 1 plafon 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	Kuantitas	Satuan	Harga Bahan yang Digunakan (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	Fiberglass (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	Kuantitas	Satuan	Harga Bahan yang Digunakan (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	Fiberglass (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	Kuantitas	Satuan	Harga Bahan yang Digunakan (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	Fiberglass (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	Kuantitas	Satuan	Harga Bahan yang Digunakan (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	Fiberglass (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

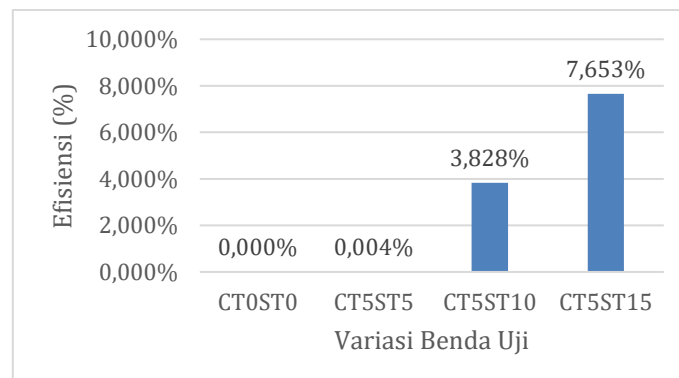
No	Variasi Plafon	Total Biaya (Rp)	Selisih Biaya Hemat (Rp)	Persentase Efisiensi (%)
1	CT0ST0 (Kontrol)	457,63	0,00 (Acuan)	0,000%
2	CT5ST5	457,61	0,02	0,004%
3	CT5ST10	440,11	17,52	3,828%
4	CT5ST15	422,61	35,02	7,652%

Selain pada ukuran 10×10×0,6 cm, analisis biaya juga dilakukan pada ukuran benda uji 20×10×0,6 cm. Hasil perhitungan selisih biaya dan efisiensi produksi disajikan pada **Tabel 4.17**.

Tabel 4. 17 Hasil Analisis Selisih Biaya dan Efisiensi Plafon 20x10x0,6

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

Perbandingan nilai efisiensi biaya produksi pada setiap variasi campuran disajikan dalam bentuk grafik pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4. 11 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 dengan performa keseluruhan paling seimbang 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 Rekap 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 4.17**, dapat disimpulkan bahwa substitusi serat tebu dan serbuk cangkang telur secara keseluruhan berhasil meningkatkan beberapa parameter mutu dan efisiensi papan GRC dibandingkan dengan varian kontrol (CT0ST0). Variasi CT5ST5 memberikan performa mekanis paling unggul dengan nilai kuat lentur tertinggi mencapai 112,59 kgf/cm², meskipun menunjukkan karakteristik fisik terendah pada parameter penyerapan air

(10,53%) dan kerapatan ($1,55 \text{ gr/cm}^3$). Di sisi lain, peningkatan ketahanan terhadap api yang paling optimal dicapai oleh variasi CT5ST10 dan CT5ST15 dengan skor kerusakan minimum (Skor 2), di mana variasi CT5ST15 sekaligus menjadi varian paling ekonomis dengan nilai efisiensi biaya tertinggi sebesar 7,652%.

Pada hasil pengujian penyerapan air, penyerapan panas, dan kerapatan memiliki keterkaitan terhadap perubahan porositas mikrostruktur akibat substitusi *bio-waste*. Penurunan kerapatan dari $1,66 \text{ g/cm}^3$ pada CT0ST0 menjadi $1,55 \text{ g/cm}^3$ pada CT5ST5 menunjukkan peningkatan volume rongga pada struktur komposit. Hal ini disebabkan oleh karakteristik serat tebu yang memiliki densitas rendah serta kemungkinan terbentuknya udara terperangkap selama proses pencampuran. Pada beton berserat tebu, peningkatan kadar serat dapat meningkatkan kandungan udara dan porositas akibat terbentuknya ruang kosong di sekitar serat dan antarmuka serat–matriks (Ribeiro dkk., 2020). Peningkatan porositas menyebabkan penyerapan air meningkat karena rongga terbuka dan pori kapiler menyediakan jalur masuknya air ke dalam matriks. Hal tersebut terlihat dari peningkatan penyerapan air dari 8,50% menjadi 10,53%. Selain itu, distribusi serat yang tidak merata dapat membentuk saluran kapiler sehingga meningkatkan penetrasi air.

Pada beton berserat, distribusi serat yang tidak merata dapat membentuk saluran kapiler dan meningkatkan keterhubungan pori, sehingga penetrasi air menjadi lebih besar. Sementara itu, kenaikan laju penyerapan panas dari 0,14 J/s menjadi 0,23 J/s perlu ditafsirkan dengan mempertimbangkan kondisi kadar air dan struktur pori sampel. Rongga yang berisi udara biasanya bersifat menghambat konduksi panas, sedangkan pori yang telah terisi air berpotensi meningkatkan transfer panas dibandingkan pori kering (Chau dkk., 2024). Pada variasi CT5ST10 dan CT5ST15, peningkatan jumlah serat mulai mengisi sebagian pori mikro sehingga kerapatan meningkat kembali, diikuti dengan penurunan penyerapan air dan kestabilan laju penyerapan panas.

Dengan demikian, pemanfaatan kedua limbah ini secara sinergis mampu menciptakan material plafon alternatif yang tidak hanya memiliki kekuatan mekanis dan ketahanan api yang baik, tetapi juga memberikan nilai tambah dari aspek efisiensi biaya produksi.