

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian plafon GRC dengan penambahan serbuk kaca sebagai substitusi parsial semen dan serat bambu sebagai substitusi parsial fiberglass, telah dilakukan serangkaian pengujian untuk mengevaluasi karakteristik material, sifat fisik, dan sifat mekanik benda uji. Pengujian yang dilakukan meliputi uji densitas (kerapatan), daya serap air, ketahanan api, dan kuat lentur. Selain itu, dilakukan pula analisis numerik menggunakan software ANSYS untuk membandingkan hasil simulasi dengan pengujian laboratorium. Bagian berikut ini menyajikan analisis hasil pengujian yang telah di peroleh pada proses penelitian:

4.1. Pengujian Material

4.1.1. Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui massa jenis masing-masing material penyusun yang digunakan dalam campuran plafon GRC. Hasil pengujian berat jenis digunakan sebagai dasar dalam perhitungan *job mix design* sehingga proporsi campuran dapat ditentukan secara tepat. Penentuan komposisi campuran yang sesuai diharapkan mampu menghasilkan plafon GRC dengan tingkat kerapatan, stabilitas, dan daya tahan yang baik melalui pemanfaatan serbuk kaca sebagai substitusi parsial semen dan serat bambu sebagai substitusi parsial fiberglass.

Berikut ini merupakan data pengujian berat jenis yang telah dilakukan, kemudian dihitung menggunakan rumus berikut:

a. Berat Jenis Pasir

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, pasir yang digunakan yaitu pasir muntiran yang didaotkan dari *supplier* Toko Bangunan Merapi Banyumanik seperti pada **Gambar 4.1**. Pada pengujian berat jenis pasir di peroleh data sebagaimana tercantum pada **Tabel 4.1**. Data tersebut kemudian akan digunakan sebagai perhitungan nilai berat jenis pasir.

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian Berat Jenis Pasir

PARAMETER	HASIL (g)
Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (<i>SSD</i>)	500
Benda Uji Kering Oven (<i>BK</i>)	485,9
Berat Picnometer + Aquades (<i>B</i>)	633,6
Berat Picnometer + Pasir <i>SSD</i> + Aquades (<i>Bt</i>)	957,6

**Gambar 4. 1** Pengujian Berat Jenis Pasir

Dari data yang tercantum pada **Tabel 4.1**, didapatkan nilai berat jenis pasir dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Jenis} &= \frac{BK}{((B+SSD)-Bt)} \\
 &= \frac{485,9}{((633,6+500)-957,6)} \\
 &= \frac{485,9}{176} \\
 &= 2,76 \text{ g/cm}^3
 \end{aligned}$$

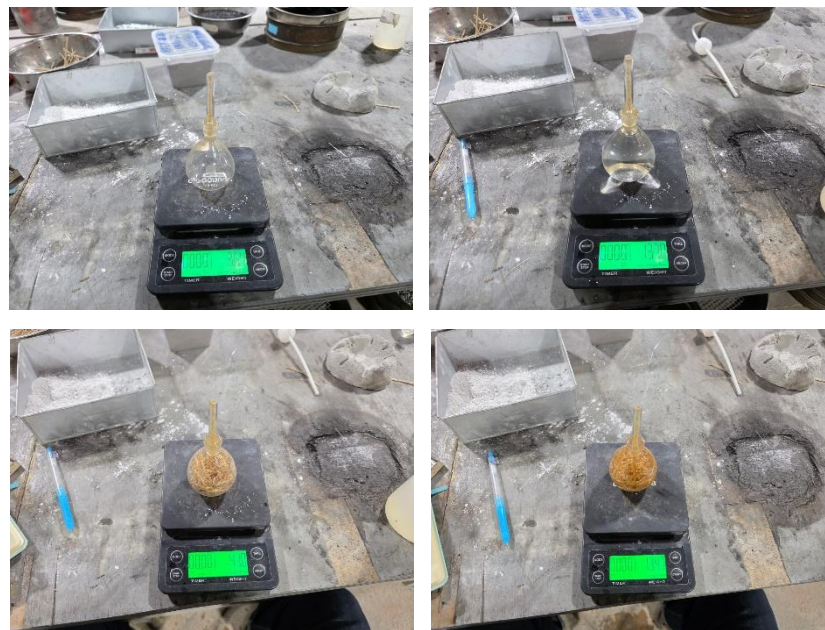
Hasil pengujian nilai berat jenis pasir yang telah dilakukan terhadap sampel pasir yang digunakan menunjukkan hasil nilai berat jenis pasir sebesar 2,76 g/cm³.

b. Berat Jenis Serat Bambu

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, bambu yang digunakan yaitu bambu yang didapatkan dari limbah bambu proyek **Gambar 4.2**. Pada pengujian berat jenis serat bambu di peroleh data sebagaimana tercantum pada **Tabel 4.2**. Data tersebut kemudian akan digunakan sebagai perhitungan nilai berat jenis serat bambu.

Tabel 4. 2 Data Hasil Pengujian Berat Jenis Serat Bambu

PARAMETER		HASIL (g)
Berat Picnometer Kosong	(W1)	37,2
Berat Picnometer + Aquades	(W2)	137,5
Suhu Picnometer + Aquades	(t)	29°
Koreksi Suhu	(T1)	0,969
Harga Air Picnometer $WT=(W2-W1)T1$		97,2
Berat Picnometer + Serbuk	(W3)	41
Berat Keseluruhan	(W4)	134,7
Suhu Keseluruhan	(t)	28°
Koreksi Suhu	(T2)	0,969



Gambar 4. 2 Pengujian Berat Jenis Serat Bambu

Dari data yang tercantum pada **Tabel 4.2**, didapatkan nilai berat jenis serat bambu dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Berat jenis} = \frac{W3 - W1}{WT - (W4 - W3)T2}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{41 - 37,2}{97,19 - (134,7 - 41)0,969} \\
 &= \frac{3,8}{6,40} \\
 &= 0,6 \text{ g/cm}^3
 \end{aligned}$$

Hasil pengujian nilai berat jenis serat bambu yang telah dilakukan terhadap sampel pasir yang digunakan menunjukkan hasil nilai berat jenis serat bambu sebesar $0,6 \text{ g/cm}^3$.

c. Berat Jenis Serbuk Kaca

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, kaca yang digunakan yaitu bambu yang didapatkan dari limbah kaca pengusaha kaca di tembalang **Gambar 4.3**. Pada pengujian berat jenis serbuk kaca di peroleh data sebagaimana tercantum pada **Tabel 4.3**. Data tersebut kemudian akan digunakan sebagai perhitungan nilai berat jenis serbuk kaca.

Tabel 4. 3 Data Hasil Pengujian Berat Jenis Serbuk Kaca

PARAMETER		HASIL (g)
Berat Picnometer Kosong	(W1)	37,3
Berat Picnometer + Aquades	(W2)	136,4
Suhu Picnometer + Aquades	(t)	29°
Koreksi Suhu	(T1)	0,969
Harga Air Picnometer $WT=(W2-W1)T1$		96,03
Berat Picnometer + Serbuk	(W3)	67,3
Berat Keseluruhan	(W4)	157,2
Suhu Keseluruhan	(t)	28°
Koreksi Suhu	(T2)	0,969





Gambar 4. 3 Pengujian Berat Jenis Serbuk Kaca

Dari data yang tercantum pada **Tabel 4.3** didapatkan nilai berat jenis serat bambu dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Berat jenis} &= \frac{W3 - W1}{WT - (W4 - W3)T2} \\
 &= \frac{67,3 - 37,3}{96,03 - (157,2 - 67,3)0,969} \\
 &= \frac{30}{10,76} \\
 &= 3,4 \text{ g/cm}^3
 \end{aligned}$$

Hasil pengujian nilai berat jenis serbuk kaca yang telah dilakukan terhadap sampel pasir yang digunakan menunjukkan hasil nilai berat jenis serbuk kaca sebesar $3,4 \text{ g/cm}^3$.

d. Berat Jenis Semen

Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh I Made Udina, (2013) semen memiliki berat jenis sebesar $3,15 \text{ t/m}^3$ atau setara dengan $3,15 \text{ g/cm}^3$. Dalam penelitian ini, menggunakan semen tipe I yaitu semen produksi PT. Semen Gresik, pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya juga menggunakan semen yang sama. Karena keterbatasan alat pengujian, digunakan nilai berat jenis yang sama sesuai dengan penelitian terdahulu untuk menentukan jobmix pada pembuatan plafon GRC dengan bahan tambah serbuk kaca dan serat bambu.

e. Berat Jenis *Fiberglass*

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Dwi Catur & Prayitno, (2014) fiberglass memiliki berat jenis sebesar $1,8 \text{ g/cm}^3$. Dikarenakan keterbatasan alat pengujian, maka digunakan nilai berat jenis yang sama sesuai dengan penelitian

terdahulu dalam menentukan job mix pada pembuatan plafon GRC dengan bahan tambah serbuk kaca dan serat bambu.

Tabel 4. 4 Rekapitulasi Hasil Pengujian Berat Jenis Material

NO	Material	Berat Jenis (g/cm ³)
1	Pasir	2,76
2	Serat Bambu	0,60
3	Serbuk Kaca	3,4
4	Semen	3,15
5	<i>Fiberglass</i>	1,8

Berdasarkan tabel rekapitulasi hasil pengujian berat jenis material, didapatkan bahwa pasir muntitan yang didapatkan dari *supplier* Toko Merapi Banyumanik memiliki berat jenis sebesar 2,76 g/cm³. Sedangkan pada pengujian berat jenis serat bambu didapatkan nilai berat jenis sebesar 0,60 g/cm³. Pada pengujian berat jenis semen tipe 1 yang di produksi oleh PT. Semen Gresik didapatkan nilai sebesar 3,15 g/cm³. Sedangkan untuk *fiberglass* memiliki berat jenis sebesar 1,8 g/cm³.

4.1.2. Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Dalam proses pengujian agregat halus yang sudah dilaksanakan, jenis yang digunakan yaitu pasir muntitan yang didapatkan dari *supplier* Toko Bangunan Merapi Banyumanik. Hasil dari pengujian mendapatkan karakteristik fisik agregat halus dengan melalui pengujian kadar lumpur yang akan disajikan pada **Tabel 4.4** dibawah ini.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Pasir

PARAMETER	SEBELUM PENGUJIAN	SETELAH PENGUJIAN
Tinggi Pasir	200 ml	204
Tinggi Pasir + Air	500 ml	487
Tinggi Lumpur		6,5



Gambar 4. 4 Pengujian Kadar Lumpur Pasir

$$\begin{aligned}
 \text{Kadar lumpur}\% &= \frac{h_1}{h_2} \times 100\% \\
 &= \frac{6,5}{(204+6,5)} \times 100\% \\
 &= 3,1\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan SNI 03-4428-1997, nilai kadar lumpur yang diizinkan pada pengujian agregat halus Adalah <5%. Hasil yang diperoleh dari pengujian ini menunjukkan nilai kadar lumpur agregat halus sebesar 3,1%, sehingga nilai tersebut berada pada batas yang diperbolehkan dan dinyatakan memenuhi syarat SNI 03-4428-1997.

4.1.3. Pengujian Karakteristik Semen

A. Pengujian Fisik Semen

Semen yang digunakan adalah semen tipe I yang di produksi PT. Semen Gresik. Berdasarkan hasil pengamatan fisik semen, memperoleh hasil warna semen berwarna abu-abu yang merata sesuai dengan karakteristik semen *portland*. Kemudian butiran semen tampak halus dan tidak terdapat gumpalan, maka dari itu menandakan kondisi penyimpanan semen sangat baik dan belum mengalami hidrasi.

Pada kemasan semen juga dalam kondisi baik, tertutup rapatm tidak ada kerusakan atau kebocoran, dan memiliki label yang sesuai dengan standar. Dengan demikian dari segi fisik semen yang telah di uji memenuhi standar yang sesuai dengan SNI 15-2049-2004.

B. Pengujian Konsistensi Normal Semen

Berdasarkan pengujian konsistensi normal yang telah dilakukan, diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Konsistensi Normal

No.	Berat Semen (gram)	Air	Konsistensi (%)	Penurunan Jarum (mm)
1	300	90	30	9

Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsistensi normal yang memenuhi SNI 15-2049-2004 mendapatkan hasil dengan presentase sebesar 30%. Nilai tersebut masih berada pada standart yang menunjukkan bahwa pasta semen memiliki tingkat keenceran yang sesuai untuk proses pengujian selanjutnya yaitu waktu ikat semen.

C. Pengujian Waktu Ikat Semen

1. Waktu Ikat Semen Tanpa Penambahan Serbuk Kaca

Berikut ini merupakan hasil dari pengujian waktu pengikat semen:

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Waktu Ikat Semen

No.	Interval Waktu (Menit)	Penurunan (mm)
1.	15	44
2.	30	43,5
3.	45	43
4.	60	42,5
5.	75	36
6.	90	30
7.	105	30
8.	120	25

Hasil pengujian waktu pengikatan semen didapatkan jarum vicat mengalami penurunan setinggi 25 mm pada menit ke 120 Pengujian ini menunjukkan waktu pengikat awal semen terjadi pada menit ke 120, dan nilai ini masih memenuhi standart SNI 15-2049-2004 yaitu waktu pengikat awal tidak kurang dari 45 menit.

2. Waktu Ikat Semen dengan Penambahan 5% Serbuk Kaca.

Berikut ini merupakan hasil dari pengujian waktu pengikatan semen:

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Waktu Ikat Semen + 5% Serbuk Kaca

No.	Interval Waktu (Menit)	Penurunan (mm)
1.	15	41
2.	30	41
3.	45	40
4.	60	40
5.	75	37
6.	90	24

Hasil pengujian waktu pengikatan semen didapatkan jarum vicat mengalami penurunan setinggi 24 mm pada menit ke 90 Pengujian ini menunjukkan waktu pengikat awal semen terjadi pada menit ke 90, dan nilai ini masih memenuhi standart SNI 15-2049-2004 yaitu waktu pengikat awal tidak kurang dari 45 menit.

3. Waktu Ikat Semen dengan Penambahan 10% Serbuk Kaca

Berikut ini merupakan hasil dari pengujian waktu pengikatan semen:

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Waktu Ikat Semen + 10% Serbuk Kaca

No.	Interval Waktu (Menit)	Penurunan (mm)
1.	15	39
2.	30	39
3.	45	30
4.	60	30
5.	75	26
6.	90	20

Hasil pengujian waktu pengikatan semen didapatkan jarum vicat mengalami penurunan setinggi 26 mm pada menit ke 75 Pengujian ini menunjukkan waktu pengikat awal semen terjadi pada menit ke 75, dan nilai ini masih memenuhi standart SNI 15-2049-2004 yaitu waktu pengikat awal tidak kurang dari 45 menit.

4. Waktu Ikat Semen dengan Penambahan 15% Serbuk Kaca:

Berikut ini merupakan hasil dari pengujian waktu pengikatan semen:

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Waktu Ikat Semen + 15% Serbuk Kaca

No.	Interval Waktu (Menit)	Penurunan (mm)
1.	15	41
2.	30	41
3.	45	40
4.	60	40
5.	75	39
6.	90	37
7.	105	37
8.	120	25

Hasil pengujian waktu pengikatan semen didapatkan jarum vicat mengalami penurunan setinggi 25 mm pada menit ke 120 Pengujian ini menunjukkan waktu pengikat awal semen terjadi pada menit ke 120, dan nilai ini masih memenuhi standart SNI 15-2049-2004 yaitu waktu pengikat awal tidak kurang dari 45 menit.

Tabel 4. 11 Hasil Rekapitulasi Pengujian Waktu Ikat Semen

No	Komposisi	Interval Waktu							
		15	30	45	60	75	90	105	120
1	Semen + 0% Serbuk kaca	44	43,5	43	42,5	36	30	30	25
2	Semen + 5% Serbuk kaca	41	41	40	40	37	24		
3	Semen + 10% Serbuk kaca	39	39	30	30	26	20		
4	Semen + 15% Serbuk kaca	41	41	40	40	39	37	37	25

Berdasarkan tabel rekapitulasi pengujian waktu ikat semen didapatkan pada komposisi semen + 0% serbuk kaca mengalami penurunan setinggi 25 mm pada menit ke 120. Sedangkan pada komposisi semen + 5% serbuk kaca mengalami penurunann setinggi 24 mm pada menit ke 90 . Pada komposisi semen + 10% serbuk kaca mengalami penurunan setinggi 26 mm pada menit ke 75 . Sementara itu pada komposisi semen + 15% serbuk kaca mengalami penurunan setinggi 25 mm pada menit ke 120. Dari hasil pengujian diatas menunjukkan bahwa seluruh

komposisi memenuhi standar yang ditetapkan oleh SNI 15-2049-2004 yaitu waktu pengikat awal semen tidak kurang dari 45 menit.

4.1.4. Pemeriksaan Fisik Air

Berdasarkan pemeriksaan terhadap sifat fisik air yang digunakan pada penelitian ini menggunakan air yang tidak memiliki bau, berwarna jernih, dan bebas dari kandungan minyak, lumpur, maupun zat lainnya yang dapat memengaruhi kualitas plafon GRC.

4.2. Hasil Uji Material

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan sebelumnya diperoleh hasil pengujian kelayakan material dibawah ini:

Tabel 4. 12 Hasil Pemeriksaan Uji Material

No	Jenis Material	Hasil Pengujian	Standar Acuan	Keterangan
1.	Agregat Halus	Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat halus memiliki kandungan lumpur sebesar 3,1%. Jika dikomparasikan dengan standar yang berlaku, nilai tersebut masih berada dalam kategori aman karena tidak melebihi batas maksimum sebesar <5%.	SNI 03-4428-1997, Metode Pengujian Agregat Halus atau Pasir yang Mengandung Bahan Plastik dengan Cara Setara Pasir	Memenuhi
2.	Semen	Pengujian fisik terhadap semen menunjukkan hasil yang representatif dan memenuhi syarat. Penilaian ini didasarkan pada tiga parameter utama yang terpenuhi, yaitu warna abu-abu yang merata, absennya gumpalan pada semen, serta integritas kemasan yang masih utuh sesuai standar.	SNI 15-2049-2004, Semen Portland	Memenuhi
		Hasil pengujian menunjukkan penurunan batang peluncur sebesar 24 mm, nilai yang masih memenuhi kriteria standar acuan sebesar 25 ± 1 mm. Capaian konsistensi normal	SNI 15-2049-2004, Semen Portland dan ASTM C 191-01a, Standard Test Method for Time of Setting	

No	Jenis Material	Hasil Pengujian	Standar Acuan	Keterangan
		sebesar 30% ini mengindikasikan tingkat keenceran pasta semen yang ideal untuk pengujian waktu ikat. Lebih lanjut, analisis terhadap waktu ikat semen menunjukkan bahwa substitusi semen menggunakan serbuk kaca cenderung mempercepat proses pengikatan. Fenomena ini diduga kuat terjadi karena sifat pozzolanik dari serbuk kaca yang mampu memicu peningkatan reaktivitas awal pada semen.	of Hydraulic Cement by Vicat Needles	
3.	Air	Air yang digunakan harus memenuhi kriteria fisis berupa kondisi yang jernih, tidak berbau, serta terbebas dari kontaminan seperti minyak, lumpur, garam, maupun zat asing lainnya. Hal ini penting guna menjaga agar kualitas plafon GRC (Glassfiber Reinforced Concrete) yang dihasilkan tidak terpengaruh secara negatif.	PBI- 1971, Peraturan Beton Bertulang Indonesia	Memenuhi

4.2.1. Analisis Pengujian Berat Jenis

a. Berat Jenis Serbuk Kaca Terhadap Berat Jenis Semen

Perbedaan berat jenis antara serbuk kaca dan semen menjadi salah satu factor yang sangat penting dan perlu di pertimbangkan dalam proses pencampuran material pada pembuatan plafon GRC. Serbuk kaca memiliki berat jenis sebesar $3,4 \text{ g/cm}^3$, lebih rendah di dibandingkan berat jenis semen yang berkisar $3,15 \text{ g/cm}^3$. Hal ini disebabkan oleh kandungan kimia serbuk kaca yang didominasi oleh silika (SiO_2) dan senyawa oksida lainnya seperti Na_2O dan CaO , yang memiliki densitas lebih besar dan struktur kaca yang cenderung padat dan tidak berpori.

Perbedaan hasil ini menyebabkan peningkatan kerapatan campuran dengan mengurangi rongga udara dalam adukan dan berpotensi meningkatkan kekuatan mekanik pada produk akhir. Namun massa partikel yang lebih berat juga dapat menyebabkan campuran menjadi lebih padat dan memiliki resiko mengurangi *workability* sehingga perlu diimbangi dengan penyesuaian rasio air. Dengan hal ini meskipun serbuk kaca memiliki berat jenis yang lebih tinggi dapat meningkatkan kerapatan mikrostruktur dan performansi struktural plafon GRC dengan syarat jika digunakan dalam proporsi yang tepat.

b. Berat Jenis Serat Bambu Terhadap Berat Jenis *Fiberglass*

Hasil pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa serat bambu memiliki berat jenis sebesar $0,60 \text{ g/cm}^3$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa serat bambu merupakan material dengan densitas yang relatif rendah sehingga berpotensi menghasilkan plafon GRC yang lebih ringan ketika digunakan sebagai bahan penguat. Sebagai data pembandingan, berat jenis fiberglass tidak diuji pada penelitian ini, melainkan mengacu pada penelitian Poso et al., (2021) yang melaporkan bahwa fiberglass memiliki berat jenis sebesar $1,8 \text{ g/cm}^3$. Perbedaan berat jenis tersebut menunjukkan bahwa serat bambu memiliki massa jenis yang jauh lebih rendah dibandingkan fiberglass. Rendahnya berat jenis serat bambu dipengaruhi oleh struktur anatominya yang tersusun atas selulosa (*cellulose*), hemiselulosa (*hemicellulose*), dan lignin, serta memiliki lumen (rongga) pada bagian tengah sel yang menyebabkan densitas serat menjadi lebih rendah dibandingkan serat sintetis (Liu et al., 2012).

Perbedaan berat jenis antara serat bambu dan fiberglass memberikan pengaruh terhadap karakteristik campuran plafon GRC. Berat jenis serat bambu yang lebih rendah berpotensi menghasilkan produk plafon yang lebih ringan sehingga dapat mengurangi beban mati bangunan serta mempermudah proses pengangkutan dan pemasangan. Namun, karakteristik tersebut juga menyebabkan serat bambu cenderung mengapung di dalam adukan semen apabila proses pencampuran tidak dilakukan secara optimal, sehingga distribusi serat menjadi kurang merata. Kondisi ini dapat menurunkan homogenitas campuran, mengurangi kualitas ikatan antara serat dan matriks semen, serta berpotensi memengaruhi sifat

mekanik plafon GRC. Oleh karena itu, penggunaan serat bambu sebagai substitusi fiberglass perlu diimbangi dengan optimasi komposisi campuran, teknik pencampuran yang tepat, dan perlakuan awal terhadap serat agar penyebarannya lebih homogen sehingga kualitas plafon GRC yang dihasilkan tetap memenuhi persyaratan teknis.

4.3. Hasil Pengujian Benda Uji

Setelah mencapai usia 14 hari dan melewati serangkaian proses yang telah direncanakan, kemudian dilakukan pengujian pada benda uji untuk memperoleh data mengenai kuat lentur, ketahanan api, densitas, dan daya serap air. Tujuan dilakukannya pengujian tersebut adalah mengidentifikasi sifat fisik dan mekanik material dalam kondisi yang telah mengalami pengerasan, namun masih dalam rentang waktu standar sesuai dengan prosedur laboratorium dan standar acuan yang digunakan.

4.3.1. Uji Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur merupakan salah satu metode pengujian sifat mekanis plafon GRC yang digunakan untuk menentukan kemampuan dalam menahan gaya lentur sebelum material mengalami retak atau patah. Tujuan adanya pengujian kuat lentur adalah untuk mengetahui sejauh mana kekuatan material terhadap beban lentur untuk menilai performa struktural material. Dalam penelitian ini digunakan 3 sampel berukuran 20 x 5 x 0,6 cm dan telah berumur 14 hari untuk memperoleh hasil yang maksimal dan dapat dianalisis secara komparatif.

Berikut merupakan perhitungan untuk menentukan nilai kuat lentur pada plafon GRC.

$$Kuat\ Lentur = \frac{3 BS}{2LT^2}$$

Keterangan:

S = Jarak Sangga (cm)

B = Beban Maksimum (Kgf)

L = Lebar benda uji (cm)

T = Tebal benda uji (cm)

$$\begin{aligned}
 \text{a. Sampel Variasi } V0_1 &= \frac{3 \times 13,256 \times 15}{2 \times 5 \times 0,6^2} \\
 &= \frac{596,52}{36} \\
 &= 16,570 \text{ kgf/cm}^2 \\
 \text{b. Sampel Variasi } V0_2 &= \frac{3 \times 19,375 \times 15}{2 \times 5 \times 0,6^2} \\
 &= \frac{871,875}{36} \\
 &= 24,218 \text{ kgf/cm}^2 \\
 \text{c. Sampel Variasi } V0_3 &= \frac{3 \times 22,434 \times 15}{2 \times 5 \times 0,6^2} \\
 &= \frac{1009,53}{36} \\
 &= 28,042 \text{ kgf/cm}^2
 \end{aligned}$$

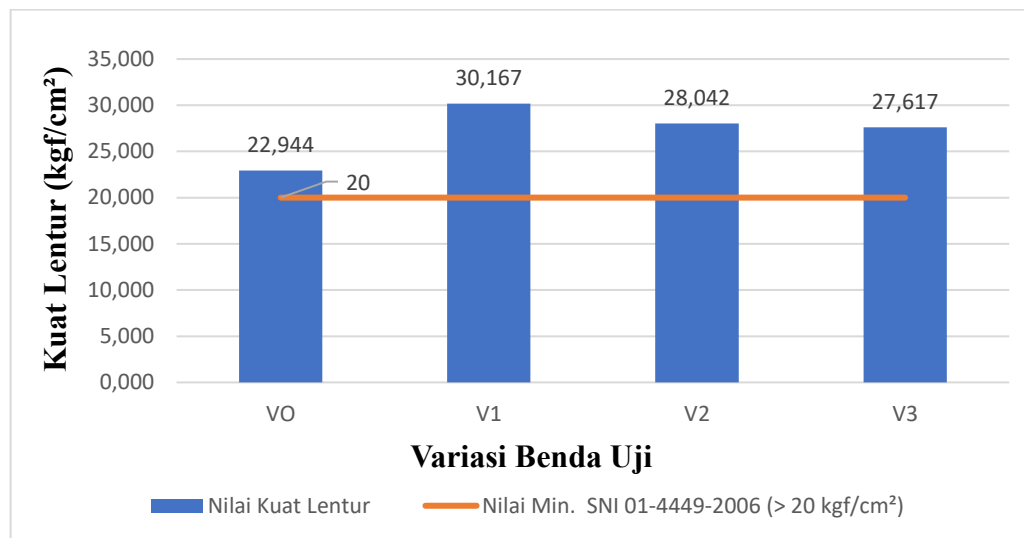
Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Kuat Lentur

Variasi	Sampel	Beban Maks (kn)	Beban Maks (kgf)	Dimensi			Kuat Lentur (kgf/cm ²)	Nilai Rata-Rata (kgf/cm)
				Jarak Sangga (cm)	Lebar (cm)	Tebal (cm)		
VO	V0 ₁	0,13	13,256	15	5	0,6	16,570	22,944
	V0 ₂	0,19	19,375	15	5	0,6	24,218	
	V0 ₃	0,22	22,434	15	5	0,6	28,042	
V1	V1 ₁	0,27	27,532	15	5	0,6	34,416	30,167
	V1 ₂	0,20	20,394	15	5	0,6	25,493	
	V1 ₃	0,24	24,473	15	5	0,6	30,592	
V2	V2 ₁	0,22	22,434	15	5	0,6	28,042	28,042
	V2 ₂	0,25	25,493	15	5	0,6	31,866	
	V2 ₃	0,19	19,375	15	5	0,6	24,218	
V3	V3 ₁	0,20	20,394	15	5	0,6	25,493	27,617
	V3 ₂	0,23	23,454	15	5	0,6	29,317	
	V3 ₃	0,22	22,434	15	5	0,6	28,042	

Keterangan:

 Variasi tertinggi

 Variasi terendah



Grafik 4. 1 Hasil Kuat Lentur



Gambar 4. 5 Pengujian Kuat Lentur

Grafik 4.1 menunjukkan hasil dari pengujian kuat lentur pada plafon GRC. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh variasi memenuhi persyaratan SNI 01-4449-2006 untuk plafon GRC. Diketahui nilai kuat lentur tertinggi terdapat pada variasi V1 dengan nilai sebesar 30,167 kg/cm² yang menunjukkan performa mekanik terbaik di antara semua variasi. Nilai tersebut secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan variasi V0 yang hanya mencapai 22,944 kg/cm². Jika dibandingkan, terjadi peningkatan antara variasi V1 dengan variasi V0 sebesar 7,223 kg/cm². Kenaikan tersebut menunjukkan bahwa penambahan serat bambu dan serbuk kaca dapat meningkatkan kinerja plafon GRC dalam menahan beban lentur.

Jika dianalisis antar variasi, selain variasi V1 yang memberikan hasil paling optimal, variasi V2 juga menunjukkan performa kuat lentur yang tinggi dengan nilai 28,042 kg/cm², hanya terpaut 2,125 kg/cm² dari variasi V1. Hal ini

menandakan bahwa kombinasi bahan pada variasi V2 tetap memberikan pengaruh penguatan yang signifikan terhadap struktur plafon. Variasi V3, dengan kuat lentur $27,617 \text{ kg/cm}^2$, meskipun berada di atas variasi V0, namun menunjukkan sedikit penurunan dibanding variasi V1 dan V3. Penurunan ini bisa dikaitkan dengan penggunaan serbuk kaca sebesar 15% pada variasi V3, yang kemungkinan telah melewati titik optimum dan menyebabkan perubahan distribusi ikatan antar partikel. Serbuk kaca yang terlalu banyak berisiko menjadi titik lemah jika tidak terdispersi sempurna dalam campuran, sehingga justru mengurangi kekuatannya.

Kontribusi serat bambu dalam meningkatkan kuat lentur juga didukung oleh hasil penelitian terdahulu yang menggunakan sistem matriks berbeda. Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Suladjarka et al., 2020) berbagai jenis serat alami yang mengandung selulosa dapat dimanfaatkan sebagai bahan penguat pada material komposit, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik, seperti kuat tarik dan kuat lentur. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Rahmadi & Adil, 2024) yang menyatakan bahwa serat bambu memiliki kandungan selulosa yang tinggi sehingga berperan sebagai bahan penguat (*reinforcement*) yang mampu meningkatkan kuat lentur pada plafon dengan hasil mencapai $38,785 \text{ kgf/cm}^3$. Serat bambu berfungsi sebagai bahan penguat dengan menjembatani retakan serta mendistribusikan tegangan secara lebih merata di dalam matriks komposit, sehingga mampu meningkatkan kuat lentur material (Kazmierowski et al., 2026). Namun apabila jumlah serat yang ditambahkan terlalu tinggi, distribusi serat menjadi kurang merata sehingga efektivitas penguatan menurun dan kuat lentur cenderung mengalami penurunan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Asres et al., (2026) menunjukkan bahwa penambahan serat bambu dalam jumlah yang lebih tinggi cenderung menurunkan nilai workability, kepadatan, serta sifat mekanik beton.

Selain penggunaan serat alami, menurut Sandika et al., (2025) limbah kaca yang diolah menjadi serbuk kaca dapat digunakan sebagai *filler* dalam konstruksi karena mengandung SiO_2 , Na_2O , dan CaO dengan persentase sekitar 70%. Hal tersebut di perkuat penelitian yang dilakukan oleh Aruchamy et al., 2024 menyatakan bahwa campuran beton yang mengandung 22,5% bubuk kaca menunjukkan

peningkatan tertinggi dalam kekuatan tarik, lentur, dan tekan (masing-masing 16,99%, 23,53%, dan 17,65%). Penelitian yang dilakukan oleh (Zahra et al., 2026) menunjukkan kadar optimum serbuk kaca dalam campuran plafon GRC berada pada angka sebesar 10 %, khususnya pada variasi C yang menghasilkan kuat lentur tertinggi sebesar 87,149 kgf/cm². Namun, pada penelitian ini nilai kuat lentur optimum diperoleh pada penambahan serbuk kaca sebesar 5% dan serat bambu 30% (variasi V1) dengan nilai kuat lentur sebesar 30,167 kgf/cm². Perbedaan kadar optimum tersebut diduga dipengaruhi oleh perbedaan komposisi campuran yang digunakan, di mana penelitian ini mengombinasikan serbuk kaca dengan serat bambu sebagai bahan penguat, sedangkan penelitian sebelumnya menggunakan komposisi campuran yang berbeda. Selain itu, perbedaan dimensi benda uji yang digunakan selama pengujian juga dapat memengaruhi distribusi tegangan dan nilai kuat lentur yang diperoleh, sehingga menghasilkan kadar optimum yang berbeda.

4.3.2. Uji Ketahanan Api

Pengujian ketahanan api merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui kemampuan plafon GRC (terhadap) paparan api pada kondisi tertentu. Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk mengevaluasi ketahanan plafon GRC terhadap pengaruh suhu tinggi dan nyala api yang dapat memengaruhi integritas, kualitas, serta kinerja material. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan menggunakan 3 sampel benda uji berumur 14 hari dengan ukuran $10 \times 10 \times 0,6 \text{ cm}^3$ untuk memperoleh data ketahanan api yang selanjutnya digunakan sebagai dasar perbandingan antarvariasi campuran.

Parameter pengujian ketahanan api pada penelitian ini merupakan modifikasi dari SNI 1741:2008 tentang Cara Uji Ketahanan Api Komponen Struktur Bangunan untuk Pencegahan Bahaya Kebakaran pada Bangunan Rumah dan Gedung. Modifikasi dilakukan karena keterbatasan fasilitas laboratorium, yaitu tidak tersedianya furnace sebagai alat uji standar. Sebagai alternatif, sumber panas diperoleh dari kompor, sedangkan benda uji ditempatkan pada ruang uji sederhana yang dibuat dari susunan batu bata yang direkatkan menggunakan semen sehingga

membentuk ruang tertutup menyerupai oven. Pengujian ini dilakukan untuk memberikan paparan panas yang lebih terfokus dan relatif stabil terhadap benda uji.

Dengan adanya modifikasi tersebut, parameter pengujian disesuaikan dengan fasilitas yang tersedia, yaitu meliputi kenaikan suhu selama proses pembakaran dan stabilitas ketahanan api yang diamati melalui perubahan kondisi fisik benda uji, seperti munculnya retakan, deformasi, atau kerusakan permukaan setelah terpapar panas. Meskipun metode ini tidak sepenuhnya mengikuti prosedur pengujian standar menggunakan furnace, pendekatan tersebut tetap dapat memberikan gambaran komparatif mengenai kemampuan setiap variasi plafon GRC.

4.3.2.1. Uji Isolasi Ketahanan Api (suhu)

Uji isolasi ketahanan api (suhu) dilakukan untuk mengetahui kemampuan plafon GRC dalam menghambat perpindahan panas akibat paparan api. Pengujian dilakukan dengan mengukur perubahan suhu pada permukaan benda uji selama proses pembakaran pada interval waktu tertentu. Semakin rendah kenaikan suhu yang terjadi, maka semakin baik kemampuan material dalam mengisolasi panas. Hasil pengujian ini selanjutnya digunakan untuk membandingkan kemampuan isolasi termal pada setiap variasi plafon GRC serta mengacu pada parameter isolasi yang dijelaskan dalam SNI 1741:2008.

Berikut merupakan contoh perhitungan kenaikan nilai isolasi pada plafon GRC:

a. Sampel Variasi V0₁ menit 0

$$= \frac{34+34+34+34+34+34+34+34+34}{9} = 34$$

b. Sampel Variasi V0₁ menit 2

$$= \frac{227+230+239+199+222+211+189+216+216}{9} = 216,6$$

c. Sampel Variasi V0₁ menit 4

$$= \frac{348+352+352+379+255+352+332+226+314}{9} = 323,3$$

d. Sampel Variasi V0₁ menit 6

$$= \frac{383+390+348+357+227+351+353+276+342}{9} = 336,3$$

e. Sampel Variasi V0₁ menit 8

$$= \frac{389+390+397+357+292+342+355+296+332}{9} = 350$$

f. Sampel Variasi V0₁ menit 10

$$= \frac{399+399+383+365+337+363+373+315+377}{9} = 367,9$$

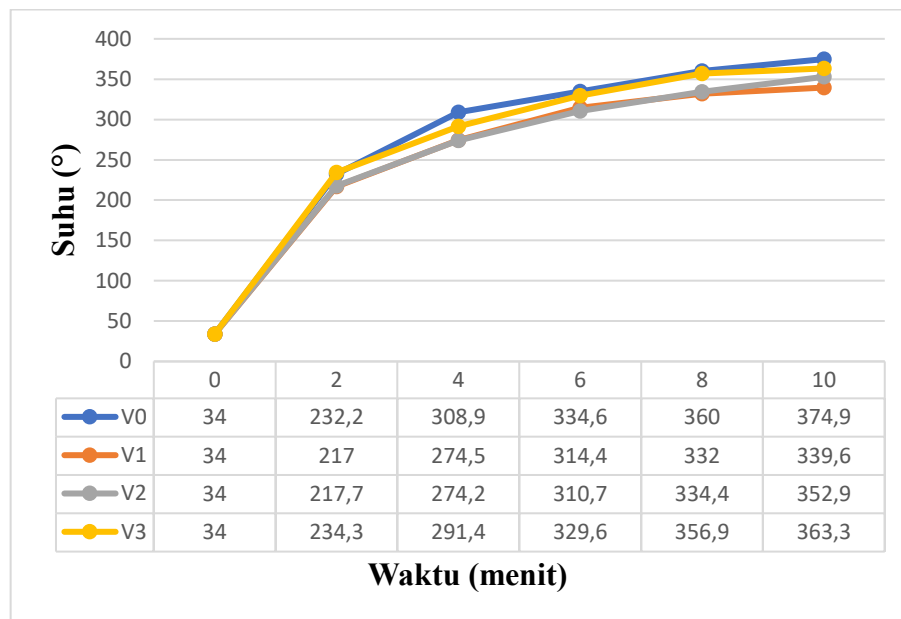
Tabel 4. 14 Hasil Pengujian Nilai Isolasi

No	varisai	Sampel	Interval Waktu (menit)					
			0	2	4	6	8	10
			Suhu (°)					
1	V 0	V01	34	216,6	323,3	336,3	350	367,9
		V02	34	254,8	324,1	361,9	377,8	385,4
		V03	34	225,3	279,3	305,4	352,1	371,3
2	V 1	V11	34	236,9	284,3	324,3	330,6	331,8
		V12	34	206,7	260,6	301,3	320,7	337,6
		V13	34	207,4	278,6	317,4	344,7	349,6
3	V 2	V21	34	201,9	267,9	284,8	304,6	330,8
		V22	34	224,3	267,6	314,3	345,6	362,9
		V23	34	226,9	287,2	333,1	353,2	365,1
4	V 3	V31	34	221,3	292,6	326,7	353,7	364,7
		V32	34	233,8	296,2	340,7	357,6	363,7
		V33	34	247,7	285,4	321,6	359,6	361,4

Berikut disajikan nilai rata-rata hasil pengujian ketahanan api pada setiap variasi plafon GRC.

Tabel 4. 15 Hasil rata – rata Nilai Isolasi

No	varisai	Interval Waktu (menit)					
		0	2	4	6	8	10
		Suhu (°)					
1	V 0	34	232,2	308,9	334,6	360,0	374,9
2	V 1	34	217,0	274,5	314,4	332,0	339,6
3	V 2	34	217,7	274,2	310,7	334,4	352,9
4	V 3	34	234,3	291,4	329,6	356,9	363,3



Grafik 4. 2 Hasil Uji Isolasi Ketahanan Api



Gambar 4. 6 Pengujian Ketahanan Api

Grafik 4.2 menunjukkan pengujian dilakukan dengan mengamati perubahan suhu pada permukaan benda uji selama 10 menit sehingga hasil yang diperoleh menggambarkan kemampuan plafon GRC dalam menghambat perpindahan panas (isolasi termal). Mengacu pada SNI 1741:2008, penilaian ketahanan api suatu elemen bangunan dilakukan berdasarkan kemampuan mempertahankan stabilitas, integritas, dan isolasi selama waktu pembakaran tertentu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi mengalami peningkatan suhu seiring bertambahnya waktu pembakaran. Variasi V1 menghasilkan suhu akhir terendah, yaitu 339,6°C, diikuti V2 sebesar 352,9°C, V3 sebesar 363,3°C, dan V0 sebesar 374,9°C. Dibandingkan variasi V0, suhu akhir pada V1 menurun sebesar 35,3°C, yang menunjukkan peningkatan kemampuan isolasi termal akibat penambahan 5%

serbuk kaca dan 30% serat bambu. Variasi V2 juga menunjukkan kemampuan menghambat perpindahan panas yang baik, sedangkan peningkatan suhu pada V3 mengindikasikan bahwa penambahan serbuk kaca dan serat bambu dalam jumlah lebih tinggi belum tentu meningkatkan ketahanan api. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh berkurangnya proporsi semen sehingga ikatan antarpartikel menjadi kurang optimal saat menerima paparan suhu tinggi.

Menurut (Lu & Poon, 2018), penambahan serbuk kaca pada material berbasis semen dapat meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi karena berfungsi sebagai bahan pengisi yang membentuk lapisan pelindung saat terpapar panas. Hal ini didukung penelitian yang dilakukan oleh Chen et al., (2020) serbuk kaca dengan ukuran partikel lebih kecil (kurang dari 0,6 mm) memberikan efek yang lebih signifikan dalam meningkatkan ketahanan api dibandingkan dengan partikel yang lebih besar. Sejalan dengan penelitian tersebut, penambahan serbuk kaca pada plafon GRC dalam penelitian ini mampu mempertahankan kondisi fisik benda uji setelah terpapar panas. Hal ini menunjukkan bahwa serbuk kaca berkontribusi dalam meningkatkan ketahanan material terhadap paparan suhu tinggi, meskipun efektivitasnya dipengaruhi oleh komposisi campuran dan distribusi partikel dalam matriks semen.

Menurut (Zhou et al., 2024), peningkatan jumlah serbuk bambu dapat mempercepat proses pembakaran sehingga berkontribusi terhadap kenaikan suhu selama paparan api. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa variasi dengan kadar serat bambu lebih tinggi menghasilkan suhu yang lebih besar. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian ini, di mana variasi dengan kadar serat bambu yang lebih tinggi menghasilkan kenaikan suhu yang lebih besar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kandungan serat bambu cenderung mengurangi kemampuan material dalam menghambat perpindahan panas, sehingga suhu pada benda uji meningkat lebih cepat selama proses pembakaran.

4.3.2.2. Uji Stabilitas Ketahanan Api (bentuk fisik/retekan)

Uji stabilitas ketahanan api dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan plafon GRC dalam mempertahankan bentuk fisik selama mengalami paparan api. Pengamatan

dilakukan terhadap perubahan kondisi benda uji, seperti terjadinya retakan, deformasi, atau kerusakan lain yang dapat memengaruhi kestabilan material. Semakin kecil tingkat kerusakan yang terjadi setelah pengujian, maka semakin baik kemampuan plafon GRC dalam mempertahankan stabilitasnya terhadap suhu tinggi. Hasil pengujian ini kemudian digunakan untuk membandingkan tingkat stabilitas setiap variasi plafon GRC dengan mengacu pada parameter stabilitas dalam SNI 1741:2008.

Berikut merupakan contoh perhitungan nilai kerusakan retakan pada plafon GRC:

a. Sampel Variasi V0₁

Total kerusakan = 7 titik

Panjang kerusakan = $1+1+0,7+1,2+1+0,5+1,8 = 7,2$ cm

b. Sampel Variasi V0₂

Total kerusakan = 6 titik

Panjang kerusakan = $2,4+2,3+3+0,2+1+1,7 = 10,6$ cm

c. Sampel Variasi V0₃

Total kerusakan = >10 titik

Panjang kerusakan = >30 cm

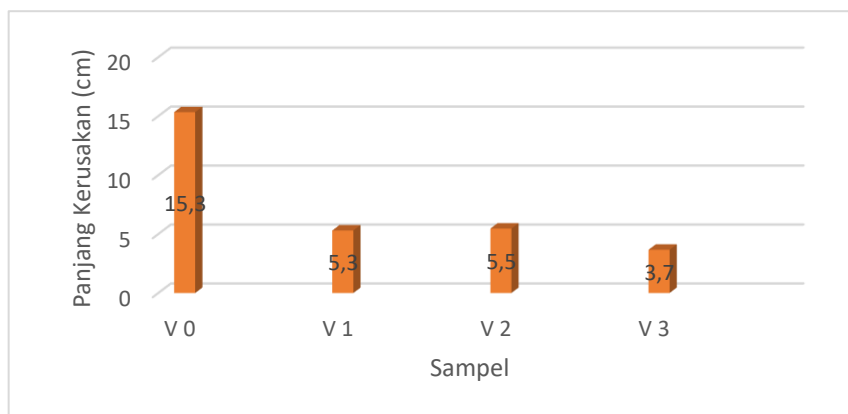
Total nilai rata – rata kerusakan varisasu V0

$$\text{Total kerusakan} = \frac{7,2+10,6+30}{3} = 15,9 \text{ cm}$$

Tabel 4. 16 Hasil Uji Stabilitas

No	varisai	Sampel	Kerusakan		
			Jumlah Kerusakan (Titik)	Panjang Kerusakan (cm)	Total Panjang Kerusakan (cm)
1	V0	V01	7	7,2	15,9
		V02	6	10,6	
		V03	>10	>30	
2	V1	V11	5	5,5	6,1
		V12	5	7,1	
		V13	5	5,6	
3	V2	V21	3	5,4	6,5
		V22	4	5,3	

No	varisai	Sampel	Kerusakan		
			Jumlah Kerusakan (Titik)	Panjang Kerusakan (cm)	Total Panjang Kerusakan (cm)
4	V3	V23	6	8,8	4,4
		V31	4	5,5	
		V32	3	3,6	
		V33	2	4,0	



Grafik 4.3 Hasil Uji Stabilitas Ketahanan Api (keretakan)

Grafik 4.3 menunjukkan hasil pengujian stabilitas ketahanan api pada plafon GRC berdasarkan jumlah dan panjang retakan yang terbentuk setelah benda uji terpapar api. Mengacu pada SNI 1741:2008, salah satu parameter penilaian ketahanan api adalah stabilitas, yaitu kemampuan suatu elemen bangunan untuk mempertahankan bentuk dan kekuatannya selama mengalami paparan api tanpa mengalami keruntuhan atau kerusakan yang dapat mengurangi fungsinya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi mengalami retakan setelah terpapar api dengan tingkat kerusakan yang berbeda. Variasi V0 mengalami kerusakan paling besar dengan total panjang retakan 15,9 cm, sedangkan variasi V3 menunjukkan kerusakan paling rendah, yaitu 4,4 cm, diikuti V1 sebesar 6,1 cm dan V2 sebesar 6,5 cm. Semakin kecil jumlah dan panjang retakan, semakin baik kemampuan material dalam mempertahankan stabilitas selama paparan suhu tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan serbuk kaca dan serat bambu meningkatkan stabilitas plafon GRC terhadap kerusakan akibat api. Variasi V3 memberikan performa terbaik, yang diduga dipengaruhi oleh peran serbuk kaca

dalam meningkatkan kekompakan matriks serta serat bambu yang menghambat perkembangan retakan selama pembakaran.

Menurut Rahmadi & Adil, (2024) peningkatan kadar serat belum meningkatkan ketahanan terhadap rambatan nyala api secara optimal, yang ditunjukkan oleh kecenderungan rambatan api yang lebih cepat pada variasi dengan kadar serat yang lebih tinggi. Namun, peningkatan kadar serat yang terlalu tinggi belum tentu meningkatkan ketahanan terhadap rambatan nyala api secara optimal. Pada penelitian ini, variasi dengan kadar serbuk kaca yang lebih tinggi justru menghasilkan jumlah dan panjang retakan yang lebih kecil. Hal ini didukung oleh Lu & Poon, (2018) yang menyatakan bahwa penambahan serbuk kaca pada material berbasis semen dapat meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi karena berfungsi sebagai bahan pengisi yang membentuk lapisan pelindung saat terpapar panas. Dengan demikian meskipun peningkatan kadar serat belum mampu meningkatkan ketahanan terhadap rambatan nyala api secara optimal, penambahan serbuk kaca memberikan kontribusi yang lebih dominan dalam meningkatkan stabilitas plafon GRC dengan mengurangi perkembangan retakan selama paparan api.

4.3.3. Densitas (Uji Kerapatan)

Uji kerapatan merupakan salah satu pengujian yang dilakukan untuk mengetahui nilai massa jenis atau densitas suatu material. Tujuan dilakukannya uji kerapatan antara lain untuk mengetahui tingkat kepadatan material pada plafon GRC yang berpengaruh terhadap kekuatan dan daya tahan material. Pengujian kerapatan yang dilakukan menggunakan 3 sampel benda uji pada setiap variasinya dengan ukuran 10 x 10 x 0,6 cm.

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk menentukan nilai kerapatan pada plafon GRC:

$$K = \frac{B}{I}$$

Keterangan:

K = Kerapatan (g/cm³)

B = Berat benda uji (g)

I = Volume benda uji (cm³)

$$\begin{aligned} \text{a. Sampel Variasi V0}_1 &= \frac{118,8}{10 \times 10 \times 0,613} \\ &= \frac{118,8}{61,3} \end{aligned}$$

$$= 1,94 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{b. Sampel Variasi V0}_2 &= \frac{124,7}{10 \times 10 \times 0,619} \\ &= \frac{124,7}{61,9} \end{aligned}$$

$$= 2,01 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{c. Sampel Variasi V0}_3 &= \frac{118,1}{10 \times 10 \times 0,606} \\ &= \frac{118,1}{60,6} \end{aligned}$$

$$= 1,95 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Rata-rata densitas benda uji V0} &= \frac{1,94 + 2,01 + 1,95}{3} \end{aligned}$$

$$= 1,97 \text{ g/cm}^3$$

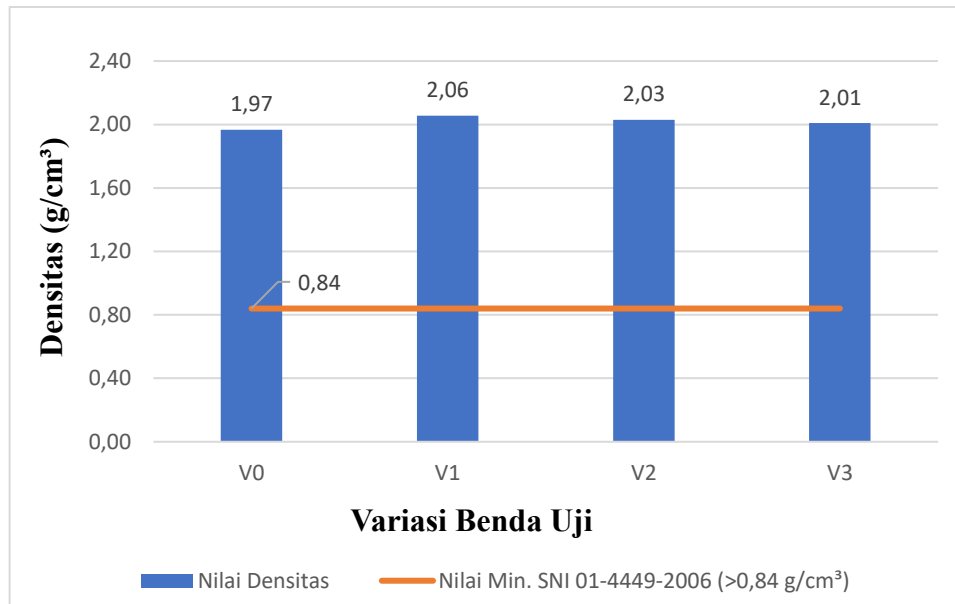
Tabel 4. 17 Hasil Uji Densitas (Kerapatan)

Variasi	Sample	Berat Awal (g)	Volume (cm)	Massa Jenis (g/cm)	Nilai Rata-Rata (g/cm)
V0	V0 ₁	118,8	61,3	1,94	1,97
	V0 ₂	118,1	60,6	1,95	
	V0 ₃	124,7	61,9	2,01	
V1	V1 ₁	130,3	63,7	2,05	2,06
	V1 ₂	134,9	65,1	2,07	
	V1 ₃	131,7	64,2	2,05	
V2	V2 ₁	133,8	65,3	2,05	2,03
	V2 ₂	130,6	65,5	1,99	
	V2 ₃	131,4	64,2	2,05	
V3	V3 ₁	134,3	65,7	2,04	2,01
	V3 ₂	134,8	67,2	2,01	
	V3 ₃	133,2	67,4	1,98	

Keterangan:

Variasi Tertinggi

Variasi Terendah



Grafik 4. 4 Hasil Densitas (Kerapatan)



Gambar 4. 7 Pengujian Densitas

Grafik 4.4 menunjukkan hasil rata-rata dari pengujian kerapatan pada setiap variasinya yang mengindikasikan pentingnya pengendalian kepadatan material dalam menentukan kualitas benda uji. Hasil uji kerapatan menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran plafon GRC pada penelitian ini berhasil memenuhi standar minimal yang ditetapkan oleh SNI 01-4449-2006, yaitu memiliki kerapatan > 0,84 g/cm³. Hal ini mengindikasikan bahwa bahan-bahan yang digunakan, termasuk serat bambu dan substitusi sebagian semen dengan serbuk kaca, tidak menyebabkan penurunan signifikan terhadap kepadatan material.

Sebagai perbandingan antar variasi, V1 memiliki nilai kerapatan tertinggi yaitu $2,06 \text{ g/cm}^3$, yang menunjukkan bahwa komposisi campuran pada variasi ini memiliki distribusi partikel paling merata dan porositas paling rendah di antara variasi lainnya. Variasi V1 menghasilkan struktur yang paling solid dan berpotensi memiliki ketahanan paling baik terhadap kerusakan. Hal ini penting karena porositas yang rendah berkorelasi positif dengan kekuatan mekanik dan daya tahan material (Al-Lami, 2021).

Variasi V2 dan variasi V3, dengan nilai kerapatan masing-masing $2,03 \text{ g/cm}^3$ dan $2,01 \text{ g/cm}^3$, juga menunjukkan hasil yang cukup baik. Nilai ini menandakan bahwa meskipun sedikit lebih rendah dari variasi V1, kedua variasi tetap memiliki struktur yang padat dan layak digunakan. Sementara itu, variasi V0 memiliki nilai kerapatan terendah, yaitu $1,97 \text{ g/cm}^3$. Nilai tersebut masih memenuhi persyaratan SNI, namun menunjukkan bahwa campuran konvensional menghasilkan struktur yang kurang padat dibandingkan campuran yang mengandung serbuk kaca dan serat bambu. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan serbuk kaca dan serat bambu mampu meningkatkan nilai kerapatan plafon GRC dibandingkan campuran konvensional, meskipun peningkatan tersebut cenderung menurun pada kadar penambahan yang lebih tinggi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Raydan et al., (2022) menunjukkan bahwa serbuk kaca mengandung silika (SiO_2) yang bersifat pozzolanik sehingga dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen membentuk gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang meningkatkan kerapatan mikrostruktur dan menurunkan porositas material. Diperkuat oleh penelitian Liang et al., (2023) menunjukkan bahwa penambahan serbuk kaca dengan tingkat kehalusan tertentu dapat mengurangi ukuran dan jumlah pori pada material berbasis semen, sehingga menghasilkan struktur yang lebih padat.

Dari sisi pengaruh serat bambu, diketahui bahwa serat alami memiliki densitas lebih rendah dibanding semen dan pasir. Maka dari itu penambahan serat dalam jumlah tinggi berisiko menurunkan kerapatan jika tidak diimbangi dengan distribusi dan pencampuran yang baik. Namun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan komposisi yang tepat terutama pada variasi V1, pengaruh negatif

tersebut dapat diminimalisir, bahkan dapat meningkatkan kepadatan jika partikel pengisi seperti serbuk kaca mampu menutup rongga antar agregat.

4.3.4. Uji Daya Serap Air

Pengujian daya serap air merupakan salah satu metode untuk menentukan seberapa besar kemampuan plafon GRC dalam menyerap air dalam berbagai macam kondisi tertentu. Tujuan dilakukannya pengujian tersebut adalah untuk mengetahui ketahanan plafon GRC terhadap paparan air yang dapat berpengaruh terhadap kualitas dan daya tahan material. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan menggunakan 3 sampel benda uji berumur 14 hari dengan ukuran 10 x 10 x 0,6 cm³ untuk memperoleh data dan dapat dibandingkan.

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk menentukan nilai daya serap air pada plafon GRC:

$$PA (\%) = \frac{B2 - B1}{B1} \times 100\%$$

Keterangan:

PA = Penyerapan Air (%)

B1 = Berat benda uji sebelum perendaman (g)

B2 = Berat benda uji setelah perendaman (g)

a. Sampel Variasi V0 ₁	$= \frac{132,2 - 118,8}{118,8} \times 100\%$ $= \frac{13,4}{118,8} \times 100\%$ $= 11,28 \%$
b. Sampel Variasi V0 ₂	$= \frac{136,6 - 124,7}{124,7} \times 100\%$ $= \frac{11,9}{124,7} \times 100\%$ $= 8,74 \%$
c. Sampel Variasi V0 ₃	$= \frac{130,8 - 118,1}{118,1} \times 100\%$ $= \frac{12,7}{118,1} \times 100\%$

$$= 10,75\%$$

$$\begin{aligned} \text{Rata-rata daya serap air benda uji V0} &= \frac{11,28+8,74+10,75}{3} \\ &= 10,26\% \end{aligned}$$

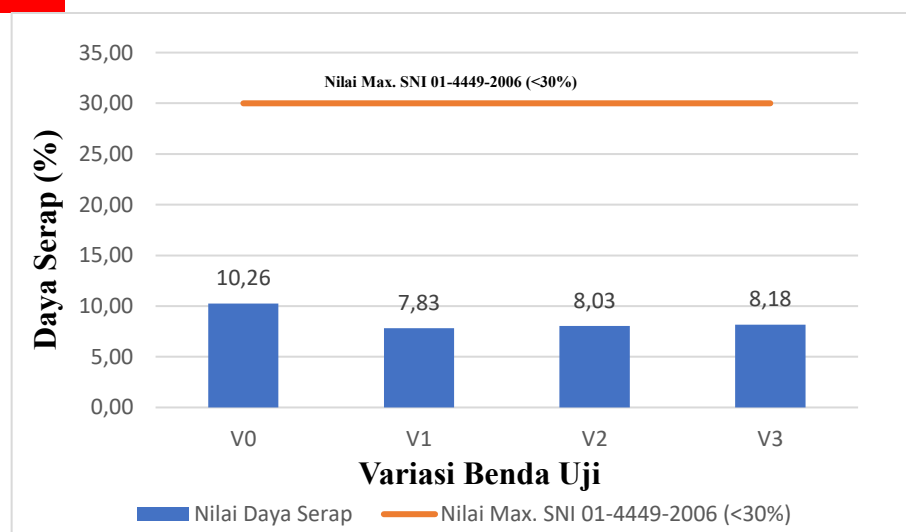
Tabel 4. 18 Hasil Pengujian Daya Serap

Variasi	Sampel	B1	B2	Daya Serap Air (%)	Nilai Rata-Rata (%)
		Berat Kering (g)	Berat Basah (g)		
V0	V0 ₁	118,8	132,2	11,28	10,26
	V0 ₂	124,7	135,6	8,74	
	V0 ₃	118,1	130,8	10,75	
V1	V1 ₁	130,3	140,2	7,60	7,83
	V1 ₂	134,9	146,2	8,38	
	V1 ₃	131,7	141,6	7,52	
V2	V2 ₁	133,8	144,4	7,92	8,03
	V2 ₂	130,6	140,6	7,66	
	V2 ₃	131,4	142,6	8,52	
V3	V3 ₁	134,3	144	7,22	8,18
	V3 ₂	134,8	146,5	8,68	
	V3 ₃	133,2	144,7	8,63	

Keterangan:

Variasi Tetinggi

Variasi Terendah



Grafik 4. 5 Hasil Uji Daya Serap Air



Gambar 4. 8 Pengujian Daya Serap

Berdasarkan **Grafik 4.5**, seluruh variasi plafon GRC, baik konvensional maupun dengan penambahan serat bambu dan serbuk kaca sebagai substitusi parsial semen, memiliki nilai daya serap di bawah batas maksimum 30% sesuai SNI 01-4449-2006. Nilai daya serap terendah diperoleh pada variasi V1 sebesar 7,83%, mengalami penurunan 2,43% dibandingkan variasi V0 sebesar 10,26%. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan serat bambu dan serbuk kaca mampu meningkatkan ketahanan material terhadap penyerapan air.

Variasi V2 menghasilkan daya serap sebesar 8,03%, sedangkan V3 sebesar 8,18%. Meskipun keduanya masih memenuhi persyaratan SNI, peningkatan nilai pada V3 mengindikasikan struktur yang sedikit lebih berpori dibandingkan V1 dan V2. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh penambahan serat bambu dan serbuk kaca dalam jumlah yang lebih tinggi, sehingga distribusi bahan dalam matriks semen menjadi kurang optimal. Oleh karena itu, variasi V1 menunjukkan komposisi paling optimum dalam menghasilkan plafon GRC dengan daya serap air yang lebih rendah.

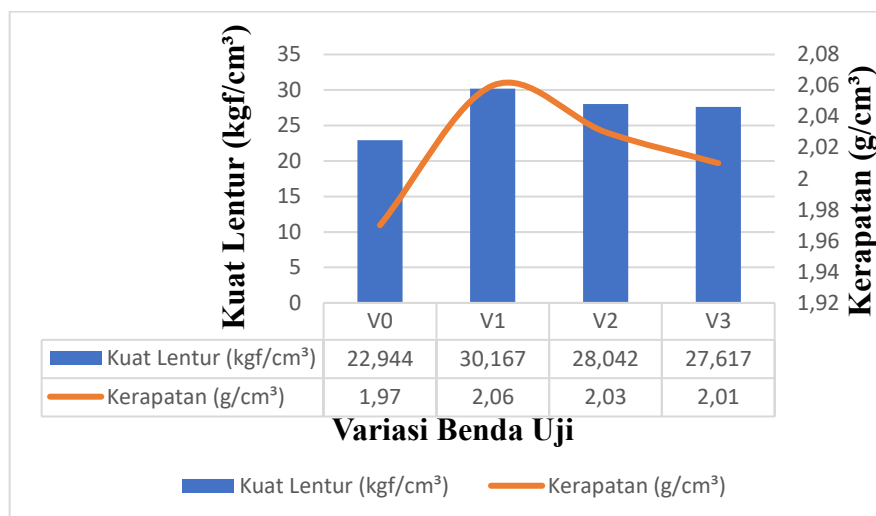
Material dengan tingkat resapan air yang rendah cenderung memiliki struktur internal yang lebih padat dan pori-pori yang tertutup, sehingga lebih tahan terhadap pelapukan, jamur, maupun keretakan akibat plafon yang lembab (Al-Lami, 2021). Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Raydan et al., (2022) menunjukkan bahwa serbuk kaca mengandung silika (SiO_2) yang bersifat pozzolanik sehingga dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen membentuk gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang meningkatkan kerapatan mikrostruktur dan menurunkan porositas material. Diperkuat oleh penelitian Liang et al., (2023) menunjukkan bahwa penambahan serbuk kaca dengan tingkat

kehalusan tertentu dapat mengurangi ukuran dan jumlah pori pada material berbasis semen, sehingga menghasilkan struktur yang lebih padat.

Di sisi lain, peningkatan nilai daya serap air pada variasi V2 dan V3 menunjukkan bahwa penambahan serat bambu dalam jumlah yang lebih tinggi turut memengaruhi kemampuan material dalam menyerap air. Hal ini didukung oleh Shettigar et al., (2025) yang menyatakan bahwa serat bambu memiliki sifat hidrofilik sehingga mudah menyerap air. Penyerapan air tersebut dapat menyebabkan pembengkakan serat (*fiber swelling*) dan memengaruhi ikatan antara serat dan matriks komposit. Akibatnya peningkatan kadar serat bambu dalam campuran dapat menyebabkan kemampuan material dalam menyerap air menjadi lebih besar dibandingkan variasi V1.

4.3.5. Hubungan Densitas dengan Kuat Lentur

Dalam analisis sifat mekanis pada plafon GRC, hubungan antara kerapatan dan kuat lentur merupakan salah satu aspek penting yang perlu diperhatikan. Pada kuat lentur, menggambarkan kemampuan material untuk menahan beban lentur tanpa mengalami kerusakan, sedangkan kerapatan berkaitan dengan kepadatan susunan partikel dalam material tersebut. Variasi dalam kerapatan juga dapat memengaruhi distribusi tegangan di dalam material tersebut dan akhirnya dapat memengaruhi performa mekaniknya. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana perubahan kerapatan dapat berpengaruh terhadap kuat lentur guna menentukan kondisi optimum bagi penggunaan material tersebut. **Grafik 4.6** menyajikan data hubungan antara kerapatan dan kuat lentur yang akan dianalisis lebih lanjut.



Grafik 4. 6 Hubungan Densitas dengan Kuat Lentur

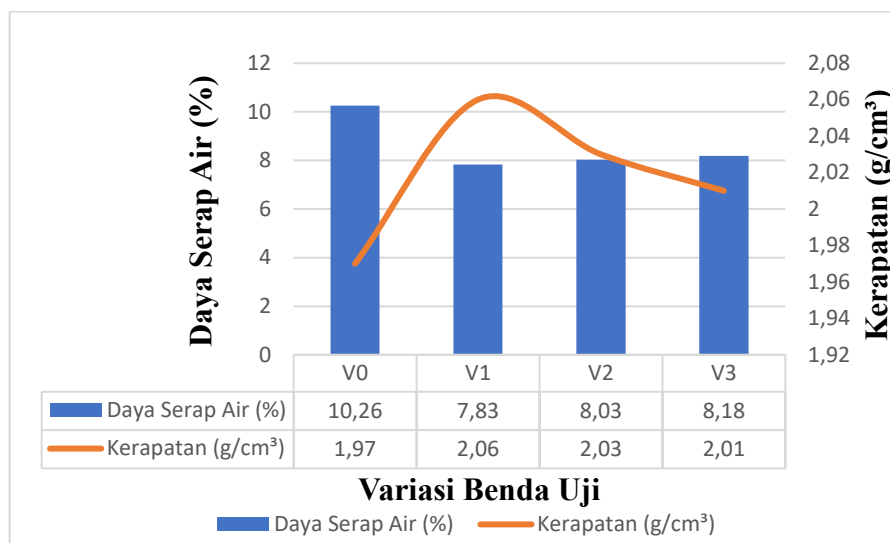
Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, **Grafik 4.6** menyajikan hubungan antara kerapatan dan kuat lentur pada plafon GRC dengan penambahan serat bambu serta substitusi parsial semen menggunakan serbuk kaca. Grafik tersebut menunjukkan adanya hubungan yang cenderung berbanding lurus antara kerapatan dan kuat lentur. Semakin tinggi nilai kerapatan material, maka nilai kuat lentur cenderung semakin meningkat. Variasi V0 memiliki kerapatan 1,97 g/cm³ dengan kuat lentur 22,944 kgf/cm². Nilai tersebut meningkat pada V1 menjadi 2,06 g/cm³ dan 30,167 kgf/cm², yang menunjukkan bahwa struktur material yang lebih padat mampu meningkatkan kemampuan dalam menahan beban lentur. Pada V2 dan V3, kerapatan menurun menjadi 2,03 g/cm³ dan 2,01 g/cm³, diikuti penurunan kuat lentur menjadi 28,042 kgf/cm² dan 27,617 kgf/cm². Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan kadar serbuk kaca dan serat bambu di atas komposisi optimum belum mampu meningkatkan kerapatan maupun kuat lentur. Kondisi ini diduga disebabkan oleh distribusi bahan yang kurang homogen sehingga terbentuk pori atau titik lemah pada matriks, yang mengurangi efektivitas transfer tegangan saat material menerima beban lentur.

Serat bambu tersusun atas lignoselulosa dengan kandungan lignin sebesar 18,86% dan hemiselulosa sebesar 18,54%, yang berperan dalam memberikan kekuatan serta memperkuat ikatan di dalam material komposit (Akbar et al., 2023). Kandungan tersebut berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan material melalui

kemampuan serat dalam menahan dan mendistribusikan tegangan, sehingga struktur komposit menjadi lebih stabil saat menerima beban lentur. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Asres et al., (2026) menunjukkan bahwa penambahan serat bambu dalam jumlah yang lebih tinggi cenderung menurunkan nilai workability, kepadatan, serta sifat mekanik beton. Selain itu, Arsasuta & Rochmah, (2024) menyatakan bahwa pemanfaatan serbuk kaca sebagai substitusi parsial semen dapat meningkatkan sifat mekanik melalui mekanisme *0,6 effect*. Serbuk kaca mengisi rongga-rongga di dalam matriks semen sehingga porositas berkurang dan ikatan antarpartikel menjadi lebih rapat. Dengan demikian, kombinasi serat bambu sebagai bahan penguat dan serbuk kaca sebagai bahan pengisi berkontribusi terhadap terbentuknya material yang lebih padat dan memiliki kuat lentur yang lebih baik pada komposisi optimum.

4.3.6. Hubungan Densitas dengan Daya Serap Air

Pada material komposit atau papan serat seperti plafon GRC yang dimodifikasi dengan menambahkan serat bambu dan substitusi parsial semen menggunakan serbuk kaca, sifat fisik seperti kerapatan dan daya serap air merupakan parameter penting yang saling berkaitan dan dapat memengaruhi performa akhir material. Kerapatan berkaitan dengan seberapa padat struktur material tersebut, sedangkan daya serap air menunjukkan seberapa besar kemampuan material menyerap kelembapan dari lingkungan sekitarnya. Pemahaman terhadap hubungan antara kedua sifat tersebut sangat penting, terutama untuk mengetahui bagaimana variasi komposisi material dapat memengaruhi ketahanan terhadap kelembapan, kekuatan struktural, serta umur pemakaian material. Oleh karena itu, pada bagian ini akan dianalisis bagaimana kecenderungan hubungan antara nilai kerapatan dan daya serap air yang dihasilkan dari 3 variasi campuran serat bambu dan serbuk kaca, berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium.



Grafik 4. 7 Hubungan Densitas dengan Daya Serap

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada **Grafik 4.7**, hubungan antara kerapatan dan daya serap air menunjukkan kecenderungan berbanding terbalik, yaitu semakin tinggi nilai kerapatan, semakin rendah daya serap air. Variasi V1 memiliki kerapatan tertinggi sebesar 2,06 g/cm³ dengan daya serap air terendah sebesar 7,83%, sedangkan variasi V0 memiliki kerapatan 1,97 g/cm³ dan daya serap air 10,26%. Pada variasi V2 dan V3, nilai kerapatan sedikit menurun menjadi 2,03 g/cm³ dan 2,01 g/cm³, diikuti peningkatan daya serap air menjadi 8,03 dan 8,18%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa komposisi pada variasi V1 menghasilkan struktur material yang paling padat, sedangkan peningkatan kadar serbuk kaca dan serat bambu pada V2 dan V3 belum mampu menghasilkan distribusi yang optimal sehingga memungkinkan terbentuknya pori-pori mikro yang meningkatkan penyerapan air. Grafik tersebut menunjukkan adanya hubungan yang cenderung berbanding terbalik antara kerapatan dan daya serap air. Semakin tinggi nilai kerapatan yang diperoleh, maka nilai daya serap air cenderung semakin rendah. Sebaliknya, ketika nilai kerapatan mengalami penurunan, nilai daya serap air cenderung meningkat. Meskipun demikian, perubahan yang terjadi pada setiap variasi tidak bersifat proporsional sehingga diperlukan analisis lebih lanjut terhadap karakteristik mikrostruktur material.

Menurut Xu et al., (2024) menyatakan bahwa distribusi serat yang homogen mampu meningkatkan kerapatan material dan menurunkan daya serap air karena

menghasilkan matriks yang lebih rapat dengan porositas yang lebih rendah. Sebaliknya, Shettigar et al., (2025) menjelaskan bahwa serat bambu memiliki sifat hidrofilik sehingga mudah menyerap air. Peningkatan kadar serat bambu dapat mengurangi kualitas ikatan antara serat dan matriks komposit apabila distribusinya kurang merata, sehingga mempermudah penetrasi air ke dalam material. Pembahasan tersebut diperkuat oleh Rocha et al., (2022) yang menyatakan bahwa penambahan bahan tambah tidak selalu meningkatkan sifat fisik material apabila melebihi komposisi optimum, karena dapat menurunkan homogenitas campuran dan meningkatkan porositas internal. Oleh karena itu, keseimbangan komposisi serbuk kaca dan serat bambu menjadi faktor penting dalam menghasilkan struktur material yang padat dengan daya serap air yang rendah.

4.4. Perbandingan Harga

Analisis biaya produksi dilakukan untuk mengetahui besarnya biaya yang dibutuhkan dalam pembuatan plafon GRC dengan penambahan serat bambu dan serbuk kaca sebagai bahan substitusi parsial semen. Analisis ini bertujuan untuk menghitung dan membandingkan biaya produksi pada setiap variasi campuran, yaitu V0, V1, V2, dan V3, sehingga dapat diketahui pengaruh penggunaan bahan tambahan terhadap total biaya pembuatan plafon GRC. Perhitungan biaya dilakukan berdasarkan kebutuhan masing-masing bahan penyusun yang digunakan pada setiap variasi, meliputi semen, pasir, air, serat bambu, serbuk kaca, dan bahan pendukung lainnya. Hasil analisis biaya produksi kemudian dibandingkan antarvariasi untuk memberikan gambaran mengenai efisiensi biaya dari masing-masing komposisi campuran. Dengan demikian, analisis ini dapat menjadi dasar dalam menilai kelayakan penggunaan serat bambu dan serbuk kaca sebagai bahan alternatif pada plafon GRC, baik dari aspek ekonomi maupun berdasarkan hasil pengujian sifat mekanik dan sifat fisik.

Pada pembahasan ini disajikan hasil perhitungan biaya produksi untuk setiap variasi campuran plafon GRC. Perhitungan disusun berdasarkan jumlah kebutuhan setiap material pada masing-masing komposisi campuran. Harga satuan material yang digunakan mengacu pada website MAS PETRUK Kota Semarang sebagai

sumber informasi harga bahan bangunan. Seluruh data harga tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam menghitung total biaya produksi pada setiap variasi campuran, yang selanjutnya disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 19 Rincian Analisis Harga Satuan Pembuatan Plafon GRC

Bahan	Satuan	Harga Satuan (Rp)
Pasir	Kg	276
Semen	Kg	1414
Air	Liter	150
<i>Fiberglass</i>	Kg	35000
Serat Bambu	Kg	5000
Sebuk Kaca	Kg	2000

Berikut merupakan analisis biaya material berdasarkan survei harga yang ada di pasaran :

- Analisis biaya plafon GRC variasi 0 tanpa penambahan serat Bambu dan serbuk kaca

Tabel 4. 20 Analisis Biaya Produksi Plafon GRC Variasi 0

Plafon GRC Variasi 0 (0% Serbuk Kaca + 0% Serat Bambu)					
No	Bahan	Qty	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah
1.	Pasir	0,0690	Kg	276	19,04
2.	Semen	0,0788	Kg	1414	111,35
3.	Air	0,0303	Liter	150	4,55
4.	<i>Fiberglass</i>	0,0036	Kg	35000	126,00
Total					260,94

Berdasarkan hasil analisis biaya produksi, plafon GRC variasi V0 dengan ukuran benda uji 10 cm × 10 cm × 0,6 cm memiliki total biaya produksi material sebesar Rp260,945. Biaya tersebut dihitung berdasarkan kebutuhan bahan penyusun, yaitu semen, pasir, air, dan fiberglass sebagai bahan penguat, tanpa penambahan serat bambu maupun serbuk kaca sebagai bahan substitusi. Dari seluruh komponen biaya, penggunaan fiberglass memberikan kontribusi biaya terbesar, diikuti oleh semen sebagai bahan utama dalam pembuatan plafon GRC.

- b. Analisis biaya plafon GRC variasi 1 dengan penambahan komposisi 30% serat Bambu dan 5% serbuk kaca

Tabel 4. 21 Analisis Biaya Produksi Plafon GRC Variasi 1

Plafon GRC Variasi 1 (5% Serbuk Kaca + 30% Serat Bambu)					
No	Bahan	Qty	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah
1.	Pasir	0,069	Kg	276	19,04
2.	Semen	0,07481	Kg	1414	105,78
3.	Air	0,03032	Liter	150	4,55
4.	<i>Fiberglass</i>	0,00252	Kg	35000	88,20
5.	Serbuk Kaca	0,00394	kg	2000	7,88
6.	Serat Bambu	0,00108	Kg	5000	5,40
Total					230,85

Berdasarkan hasil analisis biaya produksi, Plafon GRC Variasi 1 dengan ukuran benda uji $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0,6\text{ cm}$ memiliki total biaya produksi material sebesar Rp230,85. Variasi ini menggunakan campuran yang terdiri atas pasir, semen, air, fiberglass, serta penambahan 5% serbuk kaca dan 30% serat bambu sebagai bahan substitusi parsial semen. Penggunaan bahan substitusi tersebut menyebabkan kebutuhan semen dan fiberglass berkurang dibandingkan dengan campuran konvensional. Meskipun serbuk kaca dan serat bambu pada penelitian ini diperoleh melalui pembelian, kontribusi biayanya relatif kecil, yaitu masing-masing sebesar Rp7,88 dan Rp5,40, sehingga total biaya produksi tetap lebih ekonomis.

Komponen biaya terbesar pada Variasi 1 masih berasal dari semen sebesar Rp105,78 dan fiberglass sebesar Rp88,20, sedangkan biaya pasir dan air masing-masing hanya sebesar Rp19,04 dan Rp4,55. Secara keseluruhan, penggunaan serbuk kaca dan serat bambu sebagai bahan substitusi parsial semen dan *fiberglass* memberikan tambahan biaya material yang relatif rendah, namun berpotensi mengurangi penggunaan bahan utama yang memiliki harga lebih tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan kedua bahan alternatif tersebut dapat menjadi salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi biaya produksi plafon GRC sekaligus mendukung penggunaan material yang lebih ramah lingkungan.

- c. Analisis biaya plafon GRC variasi 2 dengan penambahan komposisi 40% serat Bambu dan 10% serbuk kaca.

Tabel 4. 22 Analisis Biaya Produksi Plafon GRC Variasi 2

Plafon GRC Variasi 2 (10% Serbuk Kaca + 40% Serat Bambu)					
No	Bahan	Qty	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah
1.	Pasir	0,069	Kg	276	19,04
2.	Semen	0,07088	Kg	1414	100,22
3.	Air	0,03032	Liter	150	4,55
4.	<i>Fiberglass</i>	0,00216	Kg	35000	75,60
5.	Serbuk Kaca	0,00788	kg	2000	15,76
6.	Serat Bambu	0,00144	Kg	5000	7,20
Total					222,38

Berdasarkan hasil analisis biaya produksi, Plafon GRC Variasi 2 dengan ukuran benda uji 10 cm × 10 cm × 0,6 cm memiliki total biaya produksi material sebesar Rp222,38. Variasi ini menggunakan campuran yang terdiri atas pasir, semen, air, fiberglass, serta penambahan 10% serbuk kaca dan 40% serat bambu sebagai bahan substitusi parsial semen. Peningkatan persentase penggunaan bahan substitusi tersebut menyebabkan kebutuhan semen dan fiberglass semakin berkurang dibandingkan dengan Variasi 1 maupun campuran konvensional. Meskipun serbuk kaca dan serat bambu diperoleh melalui pembelian, biaya yang ditimbulkan masih relatif kecil, yaitu masing-masing sebesar Rp15,76 dan Rp7,20, sehingga total biaya produksi tetap lebih rendah.

Penurunan biaya produksi pada Variasi 2 dipengaruhi oleh berkurangnya penggunaan semen menjadi 0,07088 kg dengan biaya Rp100,22 dan fiberglass menjadi 0,00216 kg dengan biaya Rp75,60. Sementara itu, biaya pasir dan air masing-masing sebesar Rp19,04 dan Rp4,55. Secara keseluruhan, penggunaan 10% serbuk kaca dan 40% serat bambu sebagai bahan substitusi parsial semen dan *fiberglass* mampu menghasilkan biaya produksi material yang lebih ekonomis dibandingkan variasi sebelumnya. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan proporsi bahan substitusi berpotensi meningkatkan efisiensi biaya produksi plafon GRC tanpa mengurangi penggunaan material utama secara berlebihan.

- d. Analisis biaya plafon GRC variasi 3 dengan penambahan komposisi 50% serat Bambu dan 15% serbuk kaca.

Tabel 4. 23 Analisis Biaya Produksi Plafon GRC Variasi 3

Plafon GRC Variasi 3 (15% Serbuk Kaca + 50% Serat Bambu)					
No	Bahan	Qty	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah
1.	Pasir	0,069	Kg	276	19,044
2.	Semen	0,06694	Kg	1414	94,653
3.	Air	0,03032	Liter	150	4,548
4.	<i>Fiberglass</i>	0,0018	Kg	35000	63,000
5.	Serbuk Kaca	0,01181	kg	0	0,000
6.	Serat Bambu	0,0018	Kg	0	0,000
Total					181,245

Berdasarkan hasil analisis biaya produksi, Plafon GRC Variasi 3 dengan ukuran benda uji 10 cm × 10 cm × 0,6 cm memiliki total biaya produksi material sebesar Rp213,87. Variasi ini menggunakan campuran yang terdiri atas pasir, semen, air, fiberglass, serta penambahan 15% serbuk kaca dan 50% serat bambu sebagai bahan substitusi parsial semen. Penggunaan bahan substitusi dalam jumlah yang lebih besar menyebabkan kebutuhan semen dan fiberglass semakin berkurang dibandingkan dengan variasi sebelumnya. Meskipun serbuk kaca dan serat bambu dibeli dengan harga masing-masing Rp2.000/kg dan Rp5.000/kg, kontribusi biayanya masih relatif kecil, sehingga total biaya produksi tetap menjadi yang paling rendah.

Penurunan biaya produksi pada Variasi 3 dipengaruhi oleh berkurangnya penggunaan semen dari 0,0788 kg pada Variasi 0 menjadi 0,06694 kg dan fiberglass dari 0,0036 kg menjadi 0,00180 kg. Sebaliknya, penggunaan serbuk kaca sebesar 0,01181 kg dan serat bambu sebesar 0,00180 kg hanya menambah biaya material sebesar Rp23,62 dan Rp9,00. Secara keseluruhan, total biaya produksi pada Variasi 3 sebesar Rp213,87, atau lebih rendah sebesar Rp47,08 (sekitar 18,04%) dibandingkan Variasi 0 yang memiliki biaya produksi Rp260,95. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan 15% serbuk kaca dan 50% serat bambu sebagai bahan substitusi parsial semen mampu meningkatkan efisiensi biaya produksi plafon GRC, karena penghematan akibat berkurangnya

penggunaan semen dan fiberglass lebih besar dibandingkan tambahan biaya penggunaan kedua bahan substitusi tersebut.

4.4.1 Konversi Biaya Produksi Plafon GRC

Analisis biaya produksi pada setiap variasi plafon GRC dihitung berdasarkan ukuran benda uji laboratorium, yaitu $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. Agar hasil perhitungan dapat menggambarkan estimasi biaya produksi pada ukuran yang umum dipasarkan, biaya tersebut dikonversikan ke ukuran standar plafon GRC komersial, yaitu $240\text{ cm} \times 120\text{ cm}$ per lembar. Proses konversi dilakukan dengan mempertimbangkan perbandingan volume antara benda uji laboratorium dan ukuran komersial sehingga diperoleh estimasi biaya produksi yang lebih proporsional. Hasil konversi ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menghitung perkiraan biaya produksi plafon GRC per lembar sesuai dengan ukuran yang beredar di pasaran.

Tabel 4. 24 Biaya Produksi Benda Uji

Variasi	Biaya Produksi Benda Uji (Rp)
V0 (0% SK + 0% SEB)	260,95
V1 (5% SK + 30% SEB)	230,85
V2 (10% SK + 40% SEB)	222,38
V3 (15% SK + 50% SEB)	213,87

Tabel 4. 25 Ukuran Plafon GRC

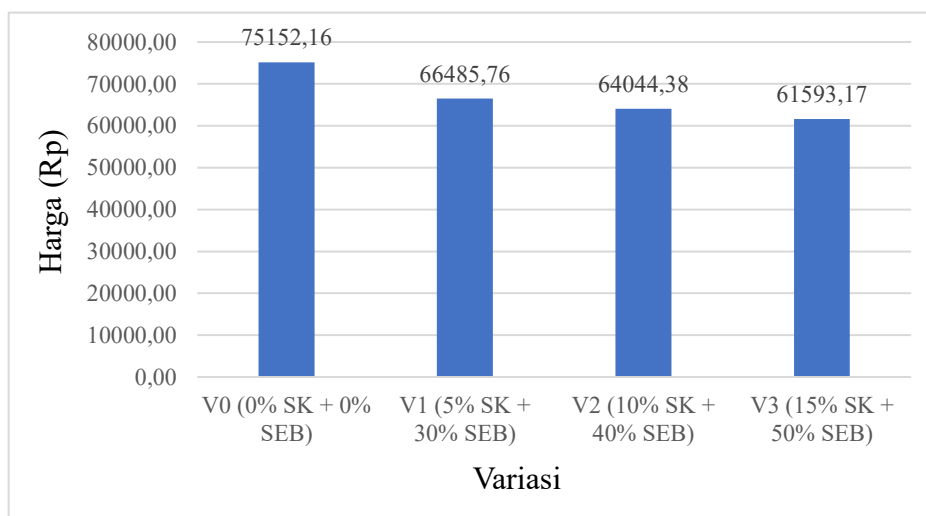
Material	Ukuran Material (cm)		Volume (cm ²)	Rasio Volume
	Panjang	Lebar		
Plafon GRC Laboratorium	10	10	100	288
Plafon GRC Komersial	240	120	28800	

Tabel 4.23 menunjukkan hasil konversi volume plafon GRC dari ukuran benda uji laboratorium ke ukuran plafon GRC komersial. Benda uji laboratorium berukuran $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ memiliki volume sebesar 100 cm^2 , sedangkan plafon GRC komersial berukuran $240\text{ cm} \times 120\text{ cm}$ memiliki volume 28800 cm^2 . Berdasarkan perbandingan tersebut, diperoleh rasio volume sebesar 288, yang menunjukkan bahwa volume plafon GRC komersial setara dengan 288 kali volume benda uji laboratorium. Nilai rasio ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk mengonversi biaya produksi hasil pengujian laboratorium menjadi estimasi biaya produksi plafon GRC per lembar ukuran komersial.

- a. Variasi 0 (0%SK + 0%SEB) = Rp 260,945 x 288
= Rp 75.512,16
- b. Variasi 1 (5%SK + 30%SEB) = Rp 217,573 x 288
= Rp 66.485,76
- c. Variasi 2 (10%SK + 40%SEB) = Rp 199,416 x 288
= Rp 64.044,38
- d. Variasi 3 (15%SK + 50%SEB) = Rp 181,245 x 288
= Rp 61.593,17

Tabel 4. 26 Harga Plafon GRC Inovasi per Lembar (m²)

Variasi	Harga (Rp)
V0 (0% SK + 0% SEB)	75152,16
V1 (5% SK + 30% SEB)	66485,76
V2 (10% SK + 40% SEB)	64044,38
V3 (15% SK + 50% SEB)	61593,17



Grafik 4. 8 Perbandingan harga

Berdasarkan hasil konversi biaya produksi ke ukuran plafon GRC komersial, terlihat bahwa biaya produksi mengalami penurunan secara bertahap seiring dengan meningkatnya persentase penggunaan serbuk kaca (SK) dan serat bambu (SEB) sebagai bahan substitusi parsial semen. Variasi V0 memiliki estimasi biaya produksi tertinggi, yaitu sebesar Rp75.152,16 per lembar, kemudian menurun pada Variasi V1 menjadi Rp66.485,76 per lembar, Variasi V2 sebesar Rp64.044,38 per

lembar, hingga mencapai biaya produksi terendah pada Variasi V3 sebesar Rp61.593,17 per lembar. Penurunan biaya tersebut menunjukkan bahwa semakin besar persentase penggunaan serbuk kaca dan serat bambu, semakin rendah biaya produksi yang dihasilkan akibat berkurangnya penggunaan semen dan fiberglass yang memiliki harga relatif lebih tinggi, sehingga Variasi V3 (15% SK + 50% SEB) menjadi alternatif yang paling ekonomis dan berpotensi memberikan efisiensi biaya produksi plafon GRC.

4.5. Visualisasi Pembebanan Kuat Lentur dengan ANSYS

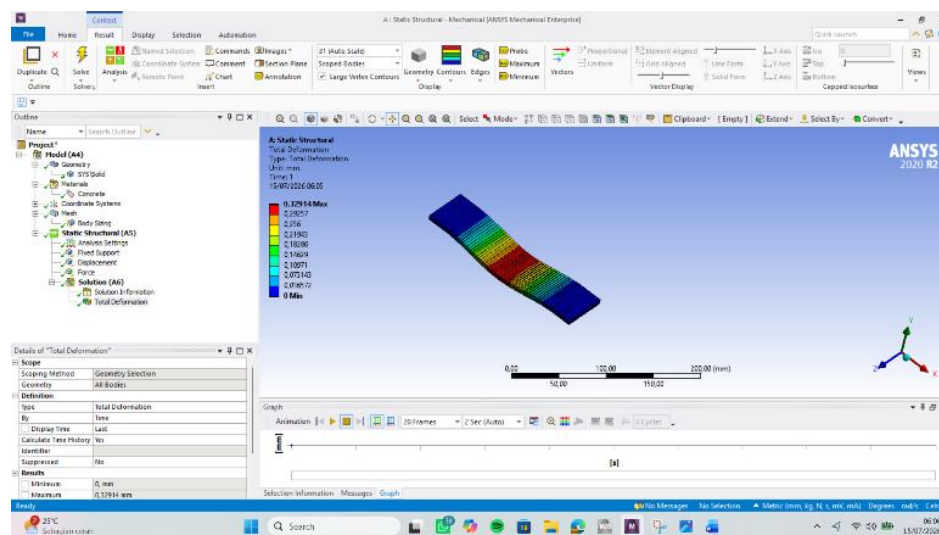
Hasil simulasi pembebanan kuat lentur pada plafon GRC menggunakan modul Static Structural pada ANSYS Workbench 2020 R2 disajikan untuk menggambarkan respons mekanis spesimen secara visual. Visualisasi ini berfokus pada tiga parameter utama guna memahami perilaku spesimen saat menerima beban, yaitu *Total Deformation* untuk mengamati pola lendutan fisik, *Normal Stress* untuk meninjau distribusi tegangan searah sumbu pembebanan, serta *Maximum Principal Stress* untuk mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan tarik maksimum yang berpotensi memicu retak awal. Ketiga visualisasi ini berfungsi sebagai data pendukung untuk menganalisis karakteristik deformasi dan titik kritis kegagalan spesimen secara lebih mendalam.

Parameter yang digunakan dalam simulasi disesuaikan dengan data hasil pengujian dan referensi pendukung. Nilai densitas material sebesar $1,97 \text{ g/cm}^3$ diperoleh dari hasil pengujian spesimen di laboratorium, sedangkan gaya pembebanan sebesar 130 N ditentukan berdasarkan beban maksimum yang diperoleh dari pengujian kuat lentur menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM). Nilai *Young's Modulus* merupakan salah satu parameter utama dalam analisis numerik karena merepresentasikan kekakuan material terhadap deformasi elastis. Majumdar et al. (1980) melaporkan bahwa *Glass Reinforced Cement* (GRC) memiliki *Young's Modulus* sekitar 9 GPa, sehingga nilai tersebut dapat dijadikan acuan dalam pemodelan material. Menurut Bartos, (2017) nilai *Poisson's ratio* material GRC umumnya berada pada kisaran 0,24 dan digunakan sebagai salah satu parameter elastis dalam analisis numerik. Penggunaan nilai *Young's Modulus* dan

Poisson's ratio mengacu pada referensi tersebut karena kedua parameter tersebut tidak dapat diperoleh secara langsung dari hasil pengujian kuat lentur menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM). Pengujian kuat lentur hanya menghasilkan data beban maksimum sehingga sifat elastis material, seperti *Young's Modulus* dan *Poisson's ratio*, diperoleh dari literatur yang membahas material GRC sebagai parameter masukan dalam simulasi ANSYS.

4.5.1. Visualisasi Total Deformation

Total deformation merupakan besarnya perpindahan atau lendutan yang dialamispesimen akibat pembebanan lentur. Nilai deformasi total sering dilaporkan dalam milimeter dan bergantung pada sifat material, kondisi beban, dan desain struktural (Atiyah et al., 2024). Menurut Hu & Yang, (2021) kontur warna pada hasil simulasi memudahkan interpretasi distribusi deformasi maupun tegangan sehingga daerah dengan nilai maksimum dan minimum dapat diidentifikasi secara visual. Penyajian dalam bentuk kontur warna juga memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pola respons struktur terhadap pembebanan, sehingga mempermudah analisis perilaku material pada setiap bagian spesimen.



Gambar 4.9 Visualisasi *Total Deformation* pada ANSYS

Pada **Gambar 4.9** menunjukkan hasil visualisasi *Total Deformation* pada spesimen plafon GRC menggunakan perangkat lunak ANSYS 2020 R2. Pada kedua ujung spesimen terlihat warna biru tua hingga biru muda, yang menandakan

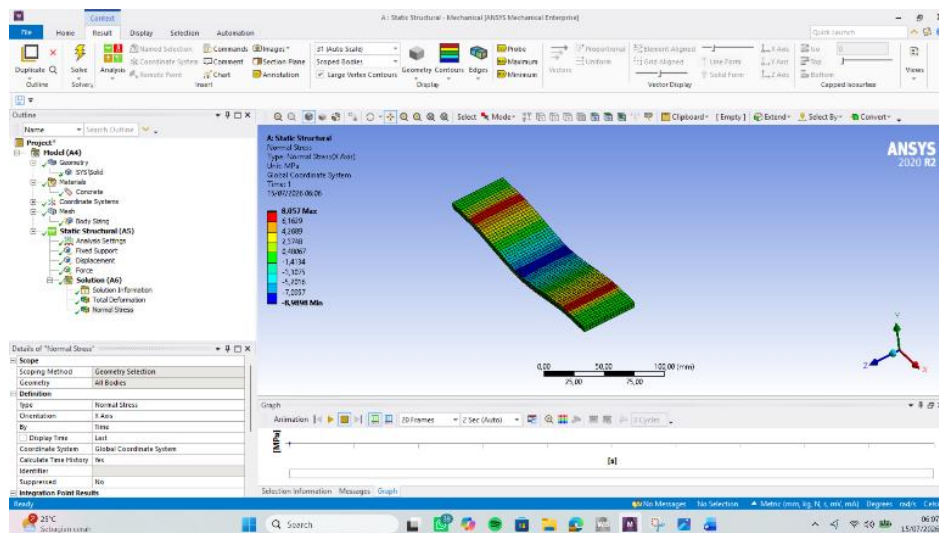
deformasi sangat kecil. Kondisi ini terjadi karena bagian tersebut berada pada tumpuan sehingga perpindahan vertikal dibatasi oleh reaksi tumpuan. Menuju bagian tengah bentang, warna berubah menjadi hijau dan kuning, menunjukkan peningkatan deformasi akibat pengaruh momen lentur yang semakin besar. Perubahan warna yang bertahap menunjukkan bahwa lendutan meningkat secara kontinu dari tumpuan menuju titik pembebanan. Daerah *orange* hingga merah berada di sekitar titik pembebanan dan menunjukkan total deformation maksimum. Hal ini disebabkan karena bagian tengah bentang menerima pengaruh pembebanan terbesar sehingga mengalami lendutan paling tinggi. Kondisi tersebut sesuai dengan perilaku struktur pada pengujian lentur, di mana lendutan maksimum terjadi di daerah yang menerima gaya, sedangkan lendutan berkurang secara bertahap menuju kedua tumpuan.

Secara keseluruhan, distribusi warna dari biru hingga merah menunjukkan pola deformasi yang merata tanpa perubahan yang signifikan pada lokasi tertentu. Visualisasi ini menggambarkan bahwa lendutan terkecil berada pada daerah tumpuan dan meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum pada bagian tengah spesimen akibat pembebanan lentur.

4.5.2. Visualisasi *Normal Stress*

Normal stress merupakan tegangan yang bekerja tegak lurus terhadap luas penampang spesimen akibat pembebanan lentur. Visualisasi *normal stress* menggunakan ANSYS mampu menunjukkan distribusi tegangan normal pada struktur secara jelas, sehingga daerah yang mengalami tegangan maksimum maupun minimum dapat diidentifikasi dengan mudah (Yi et al., 2014). Distribusi tegangan divisualisasikan menggunakan gradasi warna yang menunjukkan perbedaan besar tegangan pada setiap bagian spesimen. Menurut Hu & Yang, (2021) kontur warna pada hasil simulasi memudahkan interpretasi distribusi deformasi maupun tegangan sehingga daerah dengan nilai maksimum dan minimum dapat diidentifikasi secara visual. Penyajian dalam bentuk kontur warna juga memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pola respons struktur terhadap pembebanan, sehingga mempermudah analisis perilaku material pada setiap bagian spesimen.

Pada pengujian eksperimental, spesimen ditumpu menggunakan tumpuan rol (*roller support*). Namun pada proses simulasi di ANSYS 2020 R2, pemodelan dengan *roller support* telah dicoba tetapi tidak menghasilkan solusi karena model mengalami kendala konvergensi pada saat proses pembebanan. Oleh karena itu, kondisi tumpuan disederhanakan menjadi *fixed support* (tumpuan jepit) agar simulasi dapat berjalan dengan stabil dan menghasilkan distribusi deformasi serta tegangan yang dapat dianalisis. Penyederhanaan ini dilakukan sebagai penyesuaian terhadap keterbatasan pemodelan, tanpa mengubah tujuan utama analisis yang berfokus pada pola distribusi *respons* struktur akibat pembebanan lentur.



Gambar 4. 10 Visualisasi *Normal Stress* pada ANSYS

Pada **Gambar 4.10** menunjukkan hasil visualisasi Normal Stress pada spesimen plafon GRC menggunakan perangkat lunak ANSYS 2020 R2. Pada bagian tengah spesimen terlihat dominan warna biru tua hingga hijau, yang menunjukkan nilai tegangan normal relatif rendah. Kondisi ini terjadi karena daerah tersebut berada di sekitar sumbu netral (*neutral axis*), yaitu bagian yang mengalami perubahan tegangan dari tarik menjadi tekan sehingga nilai tegangan normal mendekati nol. Semakin menjauhi sumbu netral menuju permukaan atas dan bawah spesimen, warna berubah menjadi kuning, *oranye*, hingga merah, yang menunjukkan peningkatan nilai *normal stress*. Hal ini disebabkan karena serat terluar mengalami pengaruh momen lentur yang paling besar, sehingga menghasilkan tegangan normal yang lebih tinggi dibandingkan bagian tengah

spesimen. Pada pembebanan lentur, salah satu permukaan spesimen mengalami tegangan tekan, sedangkan permukaan lainnya mengalami tegangan tarik, sehingga distribusi tegangan meningkat seiring bertambahnya jarak dari sumbu netral.

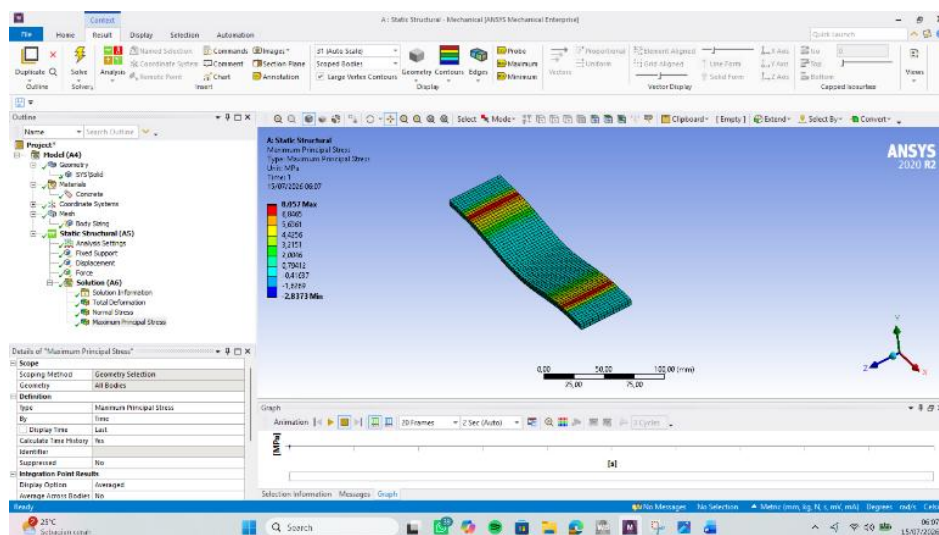
Secara keseluruhan, distribusi warna dari biru hingga merah menunjukkan bahwa *normal stress* tersebar secara bertahap pada seluruh penampang spesimen. Visualisasi ini menggambarkan bahwa tegangan normal bernilai paling kecil di sekitar sumbu netral dan meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada permukaan luar spesimen sebagai akibat dari pembebanan lentur.

4.5.3. Visualisasi *Maximum Principal Stress*

Maximum Principal Stress merupakan tegangan utama maksimum yang menunjukkan nilai tegangan tarik terbesar yang terjadi pada spesimen akibat pembebanan lentur. *Maximum Principal Stress* digunakan untuk mengidentifikasi daerah yang mengalami tegangan tarik maksimum, sehingga dapat memprediksi lokasi awal terjadinya retak dan arah perambatan retak pada material yang memiliki kekuatan tarik rendah. Distribusi *Maximum Principal Stress* digunakan untuk mengidentifikasi lokasi konsentrasi tegangan tarik maksimum serta memprediksi arah awal perambatan retak pada material (Liu et al., 2019). Distribusi tegangan divisualisasikan menggunakan gradasi warna yang menunjukkan perbedaan nilai tegangan utama pada setiap bagian spesimen. Menurut Hu & Yang, (2021) kontur warna pada hasil simulasi memudahkan interpretasi distribusi deformasi maupun tegangan sehingga daerah dengan nilai maksimum dan minimum dapat diidentifikasi secara visual. Penyajian dalam bentuk kontur warna juga memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pola respons struktur terhadap pembebanan, sehingga mempermudah analisis perilaku material pada setiap bagian spesimen.

Pada pengujian eksperimental, spesimen ditumpu menggunakan tumpuan rol (*roller support*). Namun, pada proses simulasi di ANSYS 2020 R2, pemodelan dengan roller support telah dicoba tetapi tidak menghasilkan solusi karena model mengalami kendala konvergensi selama proses pembebanan. Oleh karena itu, kondisi tumpuan disederhanakan menjadi *fixed support* (tumpuan jepit) agar simulasi dapat berjalan dengan stabil dan menghasilkan distribusi *Maximum*

Principal Stress yang dapat dianalisis. Penyederhanaan ini dilakukan sebagai penyesuaian terhadap keterbatasan pemodelan, tanpa mengubah tujuan utama analisis, yaitu untuk mengidentifikasi pola distribusi tegangan tarik utama serta daerah yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan akibat pembebanan lentur.



Gambar 4. 11 Visualisasi *Maximum Principal Stress* pada ANSYS

Pada **Gambar 4.11** menunjukkan hasil visualisasi *Maximum Principal Stress* pada spesimen plafon GRC menggunakan perangkat lunak ANSYS 2020 R2. Pada bagian tengah spesimen terlihat dominan warna hijau hingga biru, yang menunjukkan nilai tegangan tarik utama relatif rendah. Kondisi ini terjadi karena daerah tersebut berada di sekitar sumbu netral, sehingga pengaruh tegangan tarik akibat pembebanan lentur masih kecil. Menuju permukaan bawah spesimen, warna berubah menjadi kuning, *oranye*, hingga merah, yang menunjukkan peningkatan nilai *Maximum Principal Stress*. Hal ini disebabkan karena permukaan bawah merupakan daerah yang mengalami tegangan tarik terbesar akibat pembebanan lentur. Ketika gaya diberikan pada bagian tengah bentang, spesimen mengalami pembengkokan sehingga serat bagian bawah mengalami peregangan (tarik), sedangkan serat bagian atas mengalami pemendekan (tekan). Oleh karena itu, nilai *Maximum Principal Stress* terkonsentrasi pada permukaan bawah di sekitar daerah pembebanan.

Secara keseluruhan, distribusi warna dari biru hingga merah menunjukkan pola penyebaran tegangan tarik utama yang meningkat dari bagian dalam menuju permukaan luar spesimen. Visualisasi ini menggambarkan bahwa nilai *Maximum Principal Stress* tertinggi berada pada permukaan bawah di sekitar tengah bentang, sehingga daerah tersebut menjadi lokasi yang paling berpotensi mengalami inisiasi retak ketika spesimen menerima pembebanan lentur.