



BAB IV
PEMBAHASAN

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1. Data Hasil Pengujian Material

Sebelum dilakukan pembuatan benda uji, terlebih dahulu dilakukan pengujian karakteristik terhadap material penyusunnya. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa material yang digunakan telah memenuhi spesifikasi dan standar mutu yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI).

4.1.1. Pengujian Agregat Halus

Pengujian *grain size* atau analisis saringan agregat halus diperlukan untuk mengetahui gradasi dan Modulus Kehalusan (MH) atau *Fineness Modulus* (FM) dari pasir yang akan digunakan. Adapun gradasi yang baik sangat memengaruhi kerapian dan kekuatan mekanis mortar plafon.

4.1.1.1. Grain Size Analysis

Tabel 4.1. Hasil Analisis Saringan Agregat Halus

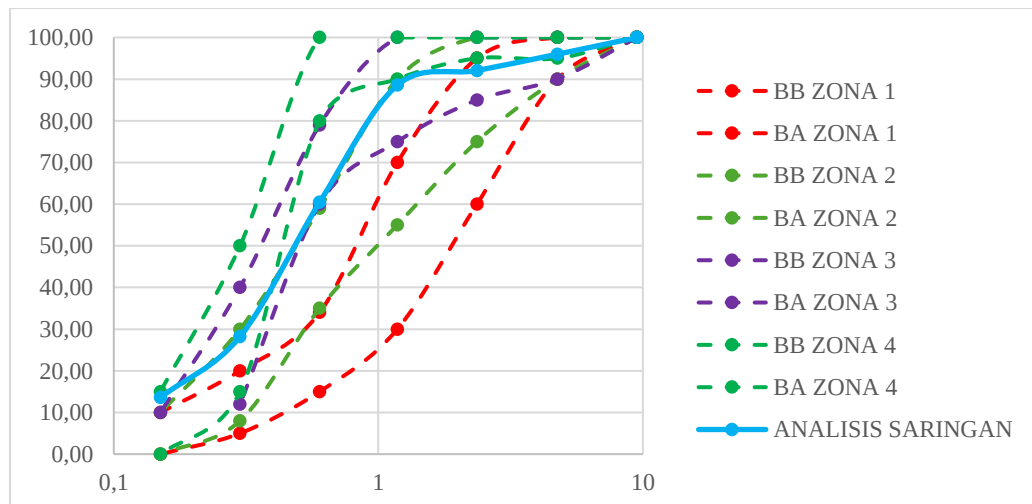
Saringan		Berat Tertahan (gram)	Persentase Berat Tertahan (%)	Persentase Tertahan Kumulatif (%)	Persentase Lolos (%)
mm	inch	(a)	(b) = (a) / W × 100%	(c)	(d) = 100 – (c)
9,50	3/8	0	0	0	100,00
4,75	No 4	40	4,02	4,02	95,98
2,36	No 8	38,86	3,91	7,93	92,07
1,18	No 16	35	3,52	11,45	88,55
0,6	No 30	279,4	28,10	39,56	60,44
0,3	No 50	320,4	32,23	71,78	28,22
0,15	No 100	145,3	14,61	86,40	13,60
0,075	No 200	75	7,54	93,94	6,06
	PAN	60,25	6,06	100	0,00
	Total (W)	994,21			

Sumber: Hasil Pengujian, 2026

- Berat awal = 1000 gr
- Berat setelah pengujian = 994,21 gr
- Persentase kehilangan berat = $\frac{W-W_1}{W} \times 100\%$
 $= \frac{1000-994,21}{1000} \times 100\%$
 $= 0,58\% < 1\%$ (memenuhi syarat, bahwa persentase kehilangan tidak boleh >1% sesuai SNI ASTM C136:2012)

- Modulus Kehalusan (FM) = $\frac{\sum \% \text{kumulatif tertahan diatas } \phi 0,150}{100}$
 $= \frac{221,14}{100}$
 $= 2,21$ (memenuhi standar FM agregat halus dan termasuk jenis pasir halus dengan rentang diantara 2,2 – 2,6)

- Zona Kekasaran Agregat Halus



Grafik 4.1. Zona Kekasaran Agregat Halus

Dari **Grafik 4.1** di atas dapat disimpulkan, persentase berat butiran yang lolos ayakan pada percobaan paling banyak memenuhi adalah pada

Zona 3. Hal ini menegaskan bahwa pasir yang digunakan tergolong dalam jenis pasir agak halus.

4.1.1.2. Pengujian Berat Jenis dan Absorpsi

Hasil pengujian berat jenis berpedoman pada ASTM C128 dan SNI 1970:2008, didapatkan data sebagai berikut

- Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD) = 500 gram
- Berat benda uji kering oven (BK) = 493,8 gram
- Berat piknometer diisi air = 704,3 gram
- Berat piknometer + benda uji SSD + air = 1022 gram

1. Berat Jenis (Bulk)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{BK}{(B + 500 - Bt)} \\
 &= \frac{494}{(704 + 500 - 1022)} \\
 &= 2,709 \text{ gr/cm}^3
 \end{aligned}$$

2. Berat Jenis Permukaan Jenuh (SSD)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{500}{(B + 500 - Bt)} \\
 &= \frac{500}{(704 + 500 - 1022)} \\
 &= 2,743 \text{ gr/cm}^3
 \end{aligned}$$

3. Berat Jenis Semu (Apparent)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{BK}{(B + BK - Bt)} \\
 &= \frac{494}{(704 + 494 - 1022)} \\
 &= 2,804 \text{ gr/cm}^3
 \end{aligned}$$

4. Penyerapan (*Absorption*)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(500 - BK)}{BK} \times 100\% \\
 &= \frac{(500 - 494)}{494} \times 100\% \\
 &= 1,26\%
 \end{aligned}$$

Menurut SNI 1970:2008, nilai berat jenis agregat halus berkisar dalam interval 1,6 gr/cm³ – 3,3 gr/cm³. Sehingga, nilai berat jenis sebesar 2,743 gr/cm³ berada pada rentang yang diizinkan.

4.1.1.3. Pengujian Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur mengacu pada SNI 03-4142-1996 dengan syarat kadar lumpur yang diizinkan $\leq 5\%$.

- Tinggi pasir + lumpur = 233 cc
- Tinggi Pasir = 225 cc
- Tinggi Lumpur = 8 cc

$$\begin{aligned}
 \text{Kandungan Lumpur} &= \frac{\text{Tinggi lapisan lumpur}}{\text{Tinggi total}} \times 100\% \\
 &= \frac{8}{233} \times 100\% \\
 &= 3,433 \%
 \end{aligned}$$

(memenuhi syarat bahwa kandungan lumpur maksimal $\leq 5\%$ sesuai SNI 03-4142-1996)

4.1.2. Pengujian Semen

4.1.2.1. Pengujian Waktu Ikat (*Setting Time*)

4.1.2.1.1. Pengujian Waktu Ikat Variasi 0%

a) Penetapan Konsistensi Normal

Tabel 4.2. Penetapan Konsistensi Normal Variasi 0%

No.	Berat Semen gram	Persentase Air %	Penurunan Jarum mm	Suhu °C	Keterangan
1.	300	28	6	25	Semen Gresik
2.	300	28,5	8	25	Semen Gresik
3.	300	29	15	25	Semen Gresik

Sumber: Hasil Pengujian, 2026

Penetapan konsistensi normal = 28,643%

Interpolasi :

$$\begin{aligned}
 Y &= Y1 + \frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \times (Y2 - Y1) \\
 &= 28,5\% + \frac{(10-8)}{(15-8)} \times (29 - 28,5)\% \\
 &= 28,5\% + \frac{2}{7} \times 0,5\% \\
 &= 28,643\%
 \end{aligned}$$

Keterangan :

Y = Persentase air saat penurunan jarum tepat berada di angka 10 mm

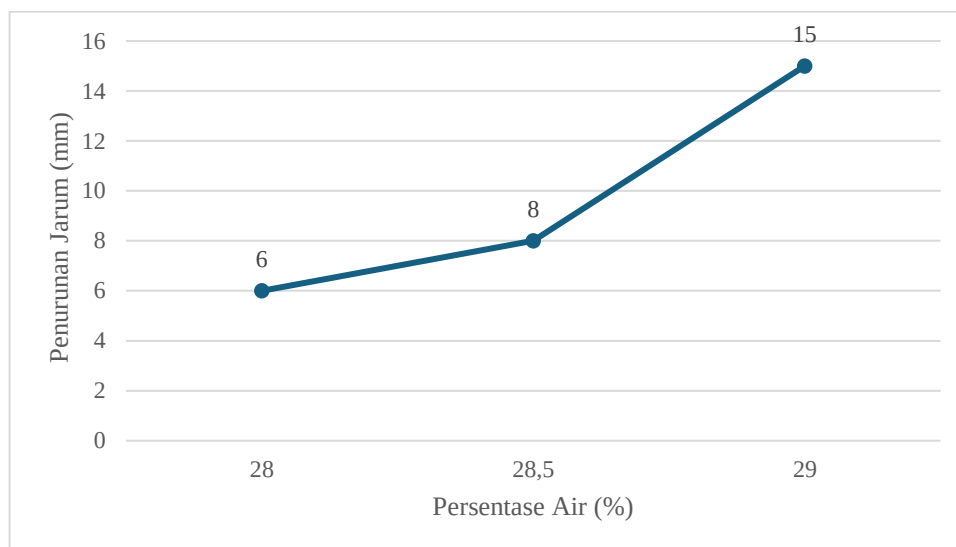
X = Penurunan jarum di angka 10 mm

X1 = Penurunan jarum di angka 8 mm

X2 = Penurunan jarum di angka 15 mm

Y1 = Persentase air saat penurunan jarum berada di angka 8 mm

Y2 = Persentase air saat penurunan jarum berada di angka 15 mm



Grafik 4.2. Konsistensi Normal V0

Berdasarkan data **Tabel 4.2** dan **Grafik 4.2**, pengujian konsistensi normal semen dengan sampel semen Gresik PCC sebanyak 300 gram pada suhu 25 °C dengan variasi persentase kadar air (28% ; 28,5% ; 29%) menunjukkan bahwa semakin besar persentase air yang digunakan, berakibat pada nilai penurunan jarum vicat semakin meningkat. Penentuan persentase ini digunakan untuk mengetahui kadar air yang seharusnya digunakan dalam pengujian waktu ikat.

Karena nilai penurunan tidak tepat 10 mm sesuai SNI 2049:2015 dengan ketentuan penurunan (10 ± 1) mm dalam waktu 30 detik setelah dilepaskan. Maka digunakan interpolasi linear persentase air dengan penurunan yang hasilnya berada diantara rentang 10 mm. Hasil perhitungan menunjukkan nilai konsistensi normal semen variasi 0% adalah 28,643%. Nilai tersebut menandakan pasta semen memiliki konsistensi yang ideal untuk pengujian waktu ikat dan sudah memenuhi standar SNI yang berlaku.

b) Penentuan Waktu Ikat Awal

Tabel 4.3. Penentuan Waktu Ikat Awal Variasi 0%

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	0	48	25	Semen Gresik
2	15	48	25	Semen Gresik
3	30	47,5	25	Semen Gresik
4	45	47,5	25	Semen Gresik
5	60	41	25	Semen Gresik
6	75	40	25	Semen Gresik
7	90	34	25	Semen Gresik
8	105	31	25	Semen Gresik
9	120	28	25	Semen Gresik
10	135	26	25	Semen Gresik
11	150	19	25	Semen Gresik

Sumber: Hasil Pengujian, 2026

Waktu ikat awal = 137,143 menit

Interpolasi :

$$\begin{aligned}
 Y &= Y_1 + \frac{(X-X_1)}{(X_2-X_1)} \times (Y_2 - Y_1) \\
 &= 135 + \frac{(25-26)}{(19-26)} \times (150 - 135) \\
 &= 135 + \frac{1}{7} \times 15 \\
 &= 137,143 \text{ menit}
 \end{aligned}$$

Keterangan :

Y = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum di angka 25 mm

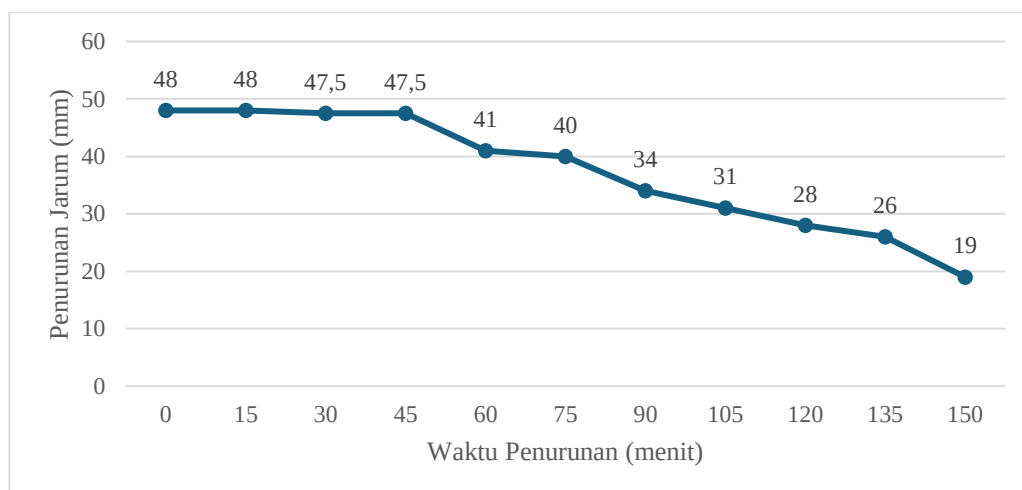
X = Penurunan jarum di angka 25 mm

X₁ = Penurunan jarum di angka 26 mm

X₂ = Penurunan jarum di angka 19 mm

Y1 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 26 mm

Y2 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 19 mm



Grafik 4.3. Waktu Ikut Awal V0

Dengan menggunakan kadar air hasil konsistensi normal (28,643%), penentuan waktu ikat awal diukur berdasarkan waktu yang dibutuhkan hingga jarum vicat mencapai penurunan (25 ± 1) mm sesuai SNI 2049:2015. Berdasarkan **Tabel 4.3** dan **Grafik 4.3** pada menit awal diantara 0 – 45 menit, pasta semen masih sangat plastis dengan penurunan dalam rentang 48 – 47,5 mm. Proses pengikatan (hidrasi) mulai terlihat secara signifikan diatas 60 menit dengan penurunan 41 mm. Penurunan mendekati target standar pada 135 menit dengan penurunan 26 mm dan pada 150 menit dengan penurunan 19 mm.

Karena nilai penurunan tidak tepat 25 mm sesuai SNI 2049:2015, maka perlu digunakan interpolasi linear dengan penurunan yang hasilnya berada diantara rentang 25 mm. Hasil perhitungan menunjukkan nilai pengikatan awal semen variasi 0% adalah pada 137,143 menit. Waktu yang diperoleh telah memenuhi standar syarat mutu semen dengan ketentuan waktu yang dibutuhkan minimal 45 menit, karena pasta semen tidak mengalami pengikatan terlalu cepat sehingga memberikan waktu pengerjaan yang cukup untuk pencetakan.

4.1.2.1.2. Pengujian Waktu Ikut Variasi 5%

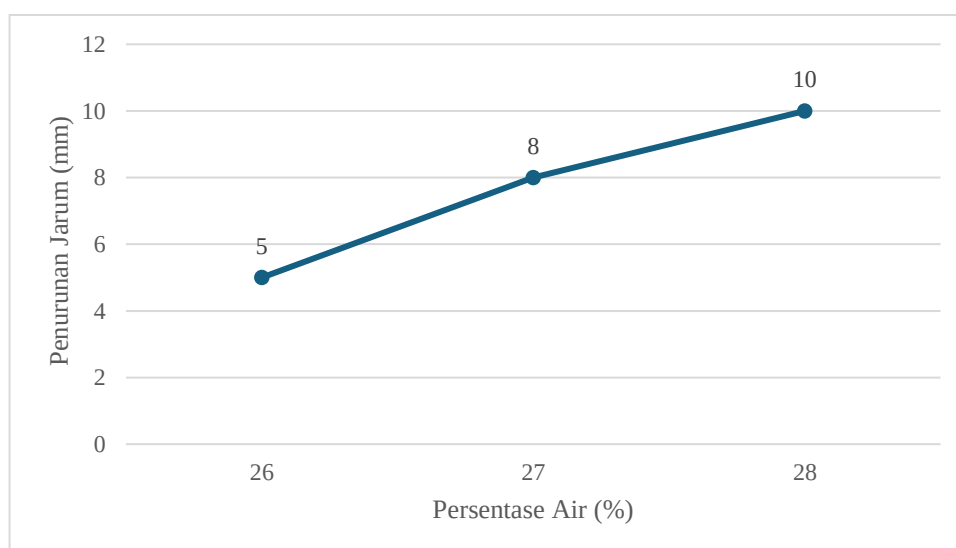
a) Penetapan Konsistensi Normal

Tabel 4.4. Penetapan Konsistensi Normal Variasi 5%

No.	Berat Semen gram	Serbuk Keramik gram	Persentase Air %	Penurunan Jarum mm	Suhu °C	Keterangan
1.	285	15	26	5	25	CWP 5%
2.	285	15	27	8	25	CWP 5%
3.	285	15	28	10	25	CWP 5%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026



Grafik 4.4. Konsistensi Normal V1

Berdasarkan data **Tabel 4.4** dan **Grafik 4.4**, pengujian konsistensi normal semen dengan sampel semen Gresik PCC sebanyak 285 gram dan serbuk limbah keramik sebanyak 15 gram pada suhu 25 °C dengan variasi persentase kadar air (26% ; 27% ; 28%) menunjukkan bahwa semakin besar persentase air yang digunakan, berakibat pada nilai penurunan jarum vicat semakin meningkat. Penentuan persentase ini digunakan untuk mengetahui kadar air yang seharusnya digunakan dalam pengujian waktu ikat.

Hasil menunjukkan nilai konsistensi normal semen variasi 5% adalah 28%, karena nilai penurunan tepat 10 mm sesuai SNI 2049:2015 dengan ketentuan penurunan (10 ± 1) mm dalam waktu 30 detik setelah dilepaskan. Nilai tersebut menandakan pasta semen memiliki konsistensi yang ideal untuk pengujian waktu ikat dan sudah memenuhi standar SNI yang berlaku.

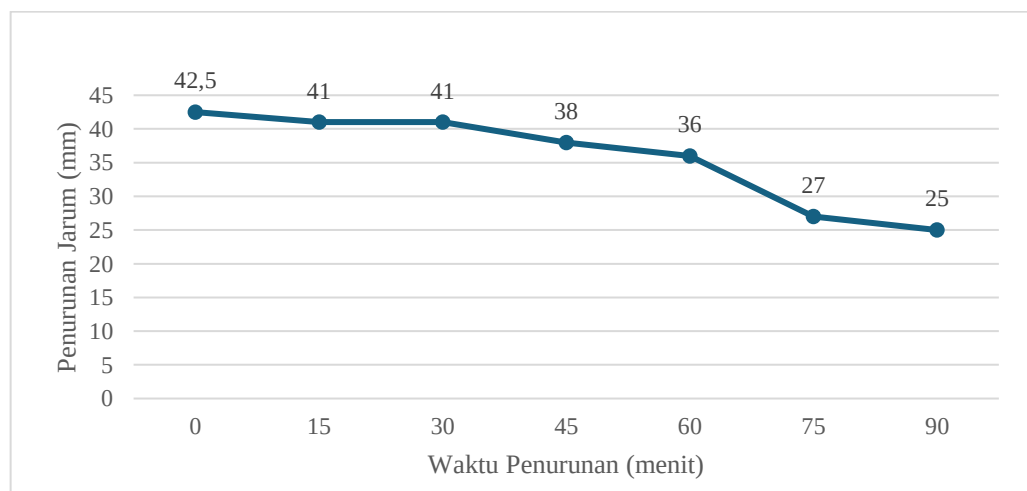
b) Penentuan Waktu Ikat Awal

Tabel 4.5. Penentuan Waktu Ikat Awal Variasi 5%

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	0	42,5	25	CWP 5%
2	15	41	25	CWP 5%
3	30	41	25	CWP 5%
4	45	38	25	CWP 5%
5	60	36	25	CWP 5%
6	75	27	25	CWP 5%
7	90	25	25	CWP 5%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026



Grafik 4.5. Waktu Ikat Awal V1

Berdasarkan **Tabel 4.5** dan **Grafik 4.5**, pengujian waktu ikat awal pada campuran semen dengan substitusi serbuk limbah keramik sebesar 5% dan menggunakan kadar air hasil konsistensi normal (28%). Penentuan waktu ikat awal diukur berdasarkan waktu yang dibutuhkan hingga jarum vicat mencapai penurunan (25 ± 1) mm sesuai SNI 2049:2015.

Hasil pengujian menunjukkan pada menit awal diantara 0 – 30 menit, pasta semen masih sangat plastis dengan penurunan dalam rentang 42,5 – 41 mm. Pasta semen mulai mengalami pengikatan bertahap setelah diatas 45 menit dengan penurunan 38 mm dan terus mengeras hingga mencapai penurunan tepat 25 mm pada waktu 90 menit. Karena nilai penurunan tepat 25 mm sesuai SNI 2049:2015, maka dihasilkan nilai pengikatan awal semen variasi 5% adalah pada 90 menit. Meskipun dengan penambahan serbuk limbah keramik sebanyak 5% mempercepat waktu ikat awal semen, waktu yang diperoleh tetap memenuhi standar syarat mutu semen dengan ketentuan waktu yang dibutuhkan minimal 45 menit. Sehingga pasta semen tidak mengalami pengikatan terlalu cepat dan memberikan waktu pengerjaan yang cukup untuk pencetakan.

4.1.2.1.3. Pengujian Waktu Ikat Variasi 10%

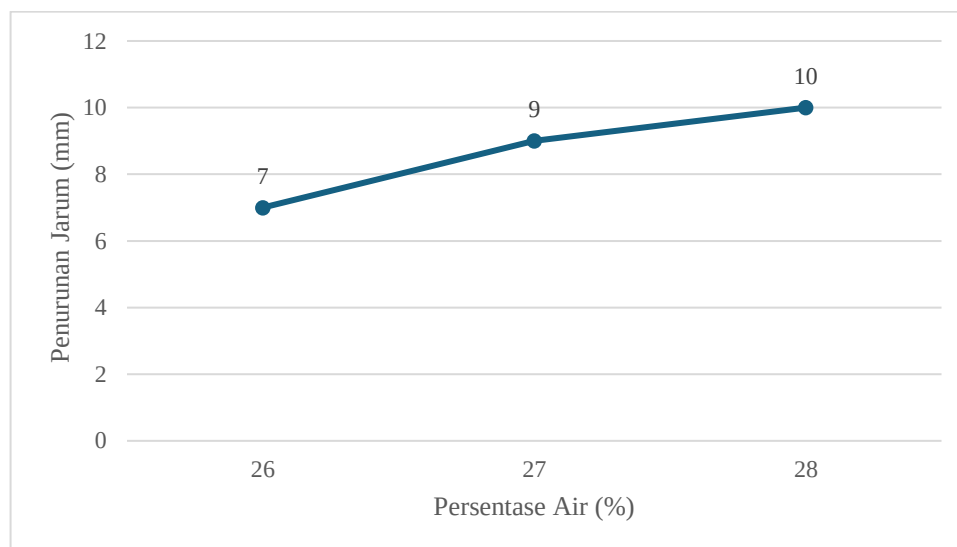
a) Penetapan Konsistensi Normal

Tabel 4.6. Penetapan Konsistensi Normal Variasi 10%

No.	Berat Semen gram	Serbuk Keramik gram	Persentase Air %	Penurunan Jarum mm	Suhu °C	Keterangan
1.	270	30	26	7	25	CWP 10%
2.	270	30	27	9	25	CWP 10%
3.	270	30	28	10	25	CWP 10%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026



Grafik 4.6. Konsistensi Normal V2

Berdasarkan data **Tabel 4.6** dan **Grafik 4.6**, pengujian konsistensi semen variasi 10% menggunakan campuran semen Gresik PCC sebanyak 270 gram dan serbuk limbah keramik sebanyak 30 gram pada suhu 25 °C. Pengujian menggunakan tiga variasi persentase kadar air (26% ; 27% ; 28%). Hasil menunjukkan bahwa semakin besar persentase air yang digunakan, berakibat pada nilai penurunan jarum vicat semakin meningkat. Penentuan persentase ini digunakan untuk mengetahui kadar air yang seharusnya digunakan dalam pengujian waktu ikat.

Sesuai SNI 2049:2015, nilai konsistensi normal tercapai saat jarum vicat menunjukkan penurunan tepat sebesar (10 ± 1) mm dalam waktu 30 detik setelah dilepaskan. Dari data yang diperoleh, penurunan tepat 10 mm langsung didapat pada kadar air 28%. Dengan demikian, hasil nilai konsistensi normal semen variasi 10% adalah 28% dan menandakan pasta semen memiliki konsistensi yang ideal untuk pengujian waktu ikat dan sudah memenuhi standar SNI yang berlaku.

b) Penentuan Waktu Ikat Awal

Tabel 4.7. Penentuan Waktu Ikat Awal Variasi 10%

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	0	47	25	CWP 10%
2	15	46	25	CWP 10%
3	30	45	25	CWP 10%
4	45	44	25	CWP 10%
5	60	41	25	CWP 10%
6	75	40	25	CWP 10%
7	90	38	25	CWP 10%
8	105	34	25	CWP 10%
9	120	33	25	CWP 10%
10	135	22	25	CWP 10%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026

Waktu ikat awal = 130,909 menit

Interpolasi :

$$\begin{aligned}
 Y &= Y1 + \frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \times (Y2 - Y1) \\
 &= 120 + \frac{(25-33)}{(22-33)} \times (135 - 120) \\
 &= 120 + \frac{8}{11} \times 15 \\
 &= 130,909 \text{ menit}
 \end{aligned}$$

Keterangan :

Y = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum di angka 25 mm

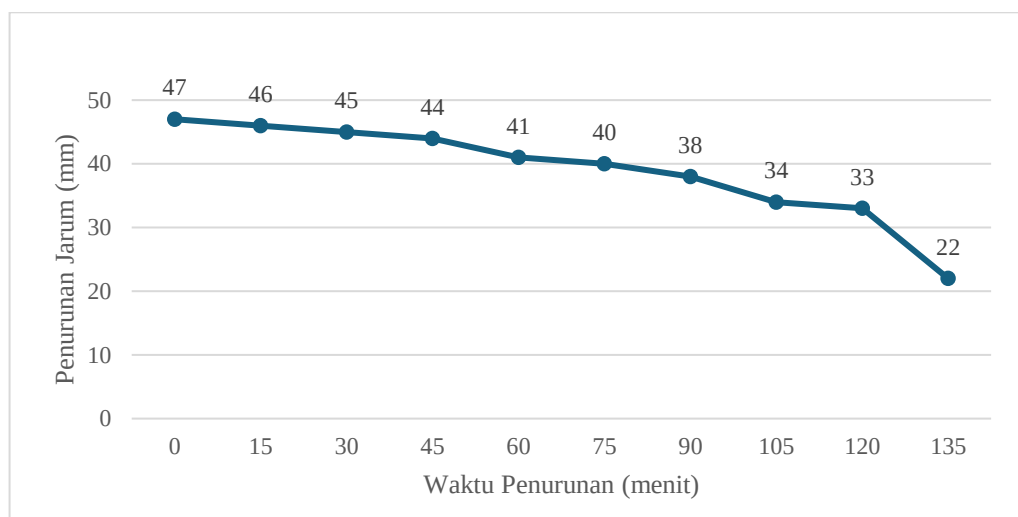
X = Penurunan jarum di angka 25 mm

X1 = Penurunan jarum di angka 33 mm

X2 = Penurunan jarum di angka 22 mm

Y1 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 33 mm

Y2 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 22 mm



Grafik 4.7. Waktu Ikut Awal V2

Berdasarkan **Tabel 4.7** dan **Grafik 4.7**, pengujian waktu ikat awal pada campuran semen dengan substitusi serbuk limbah keramik sebesar 10% dan menggunakan kadar air hasil konsistensi normal (28%). Penentuan waktu ikat awal diukur berdasarkan waktu yang dibutuhkan hingga jarum vicat mencapai penurunan (25 ± 1) mm sesuai SNI 2049:2015.

Hasil pengujian menunjukkan pada menit awal diantara 0 – 75 menit, pasta semen masih sangat plastis dengan penurunan jarum yang tinggi dalam rentang 47 – 40 mm. Pasta semen mulai mengalami pengikatan bertahap setelah diatas 90 menit dengan penurunan 38 mm hingga mencapai penurunan 33 mm pada 120 menit, serta turun menjadi 22 mm pada 135 menit. Karena target penurunan tepat 25 mm sesuai SNI 2049:2015 berada diantara pada 120 – 135 menit, perlu dilakukan interpolasi linear. Hasil perhitungan menunjukkan nilai pengikatan awal semen variasi 10% adalah pada 130,909 menit. Waktu yang diperoleh telah memenuhi standar syarat mutu semen dengan ketentuan waktu yang dibutuhkan

minimal 45 menit, karena pasta semen tidak mengalami pengikatan terlalu cepat sehingga memberikan waktu pengerjaan yang cukup untuk pencetakan.

4.1.2.1.4. Pengujian Waktu Ikat Variasi 15%

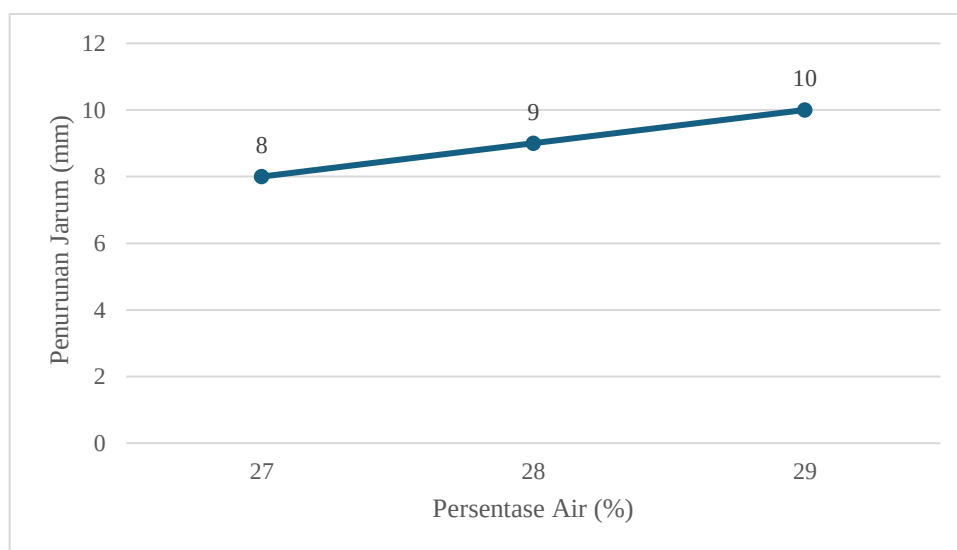
a) Penetapan Konsistensi Normal

Tabel 4.8. Penetapan Konsistensi Normal Variasi 15%

No.	Berat Semen gram	Serbuk Keramik gram	Persentase Air %	Penurunan Jarum mm	Suhu °C	Keterangan
1.	255	45	27	8	25	CWP 15%
2.	255	45	28	9	25	CWP 15%
3.	255	45	29	10	25	CWP 15%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026



Grafik 4.8. Konsistensi Normal V3

Berdasarkan data **Tabel 4.8** dan **Grafik 4.8**, pengujian konsistensi normal semen variasi 15% dengan campuran semen Gresik PCC sebanyak 255 gram dan serbuk limbah keramik sebanyak 45 gram. Pengujian dilakukan pada suhu 25 °C dengan tiga variasi persentase kadar air (27% ; 28% ; 29%). Hasil menunjukkan bahwa semakin besar persentase air yang ditambahkan, maka nilai penurunan

jarum vicat semakin meningkat/dalam karena konsistensi pasta semen semakin lebih encer. Penentuan persentase ini digunakan untuk mengetahui kadar air yang seharusnya digunakan dalam pengujian waktu ikat.

Menurut standar SNI 2049:2015, pasta semen mencapai konsistensi normal ketika nilai penurunan (10 ± 1) mm dalam waktu 30 detik setelah dilepaskan. Dari hasil data menunjukkan nilai konsistensi normal semen variasi 15% adalah 29%, karena nilai penurunan tepat 10 mm sesuai SNI 2049:2015. Nilai tersebut menandakan kadar air yang diperlukan untuk pengujian waktu ikat dan sudah memenuhi standar SNI yang berlaku.

b) Penentuan Waktu Ikat Awal

Tabel 4.9. Penentuan Waktu Ikat Awal Variasi 15%

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	0	47	25	CWP 15%
2	15	46	25	CWP 15%
3	30	46	25	CWP 15%
4	45	46	25	CWP 15%
5	60	44	25	CWP 15%
6	75	44	25	CWP 15%
7	90	44	25	CWP 15%
8	105	41	25	CWP 15%
9	120	38	25	CWP 15%
10	135	36	25	CWP 15%
11	150	26	25	CWP 15%
12	165	24	25	CWP 15%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026

Waktu ikat awal = 157,5 menit

Interpolasi :

$$\begin{aligned}
 Y &= Y1 + \frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \times (Y2 - Y1) \\
 &= 150 + \frac{(25-26)}{(24-26)} \times (165 - 150) \\
 &= 150 + \frac{1}{2} \times 15 \\
 &= 157,5 \text{ menit}
 \end{aligned}$$

Keterangan :

Y = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum di angka 25 mm

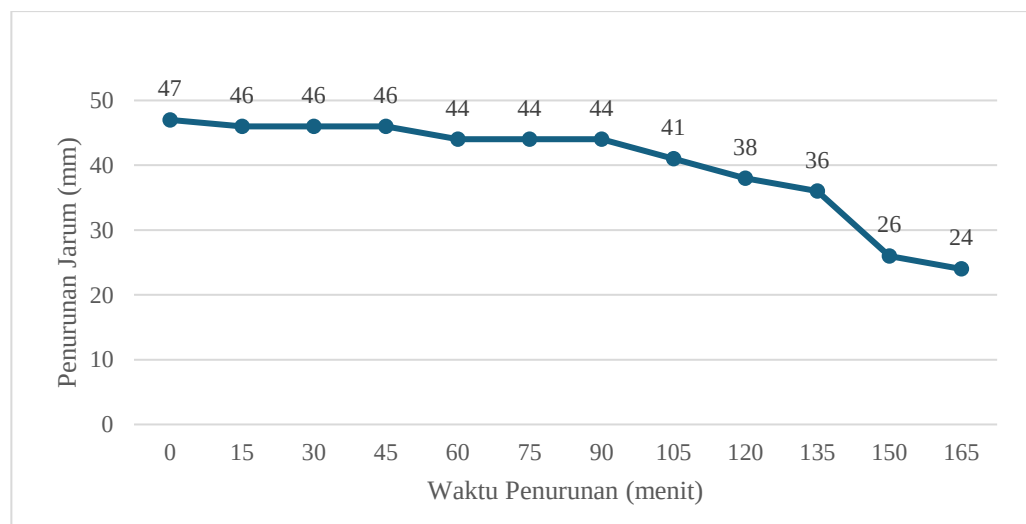
X = Penurunan jarum di angka 25 mm

X1 = Penurunan jarum di angka 26 mm

X2 = Penurunan jarum di angka 24 mm

Y1 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 26 mm

Y2 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 24 mm



Grafik 4.9. Waktu Ikat Awal V3

Berdasarkan **Tabel 4.9** dan **Grafik 4.9**, pengujian waktu ikat awal pada campuran semen dengan substitusi serbuk limbah keramik sebesar 15% dan

menggunakan kadar air hasil konsistensi normal (29%). Penentuan waktu ikat awal diukur berdasarkan waktu yang dibutuhkan hingga jarum vicat mencapai penurunan (25 ± 1) mm sesuai SNI 2049:2015.

Hasil pengujian menunjukkan proses pengerasan pasta semen berjalan dengan konsisten. Pada menit-menit awal diantara 0 – 90 menit, pasta semen masih sangat plastis dengan posisi penurunan jarum masih dalam rentang 47 – 44 mm. Mulai pada menit pertengahan antara 105 – 135 menit, pasta semen mulai mengalami pengerasan dengan penurunan jarum pada 41 – 36 mm. Pada menit akhir yaitu pada 150 – 165 menit, pasta semen mengeras lebih cepat dengan penurunan 26 mm pada 150 menit dan terus mengalami penurunan hingga 24 mm pada 165 menit.

Karena nilai penurunan tidak tepat 25 mm sesuai SNI 2049:2015, maka perlu digunakan interpolasi linear dengan penurunan yang hasilnya berada diantara rentang 25 mm. Hasil perhitungan menunjukkan nilai pengikatan awal semen variasi 15% adalah pada 157,5 menit. Waktu yang diperoleh telah memenuhi standar syarat mutu semen dengan ketentuan waktu yang dibutuhkan minimal 45 menit, karena pasta semen tidak mengalami pengikatan terlalu cepat sehingga memberikan waktu pengerjaan yang cukup untuk pencetakan.

4.1.2.1.5. Pengujian Waktu Ikat Variasi 20%

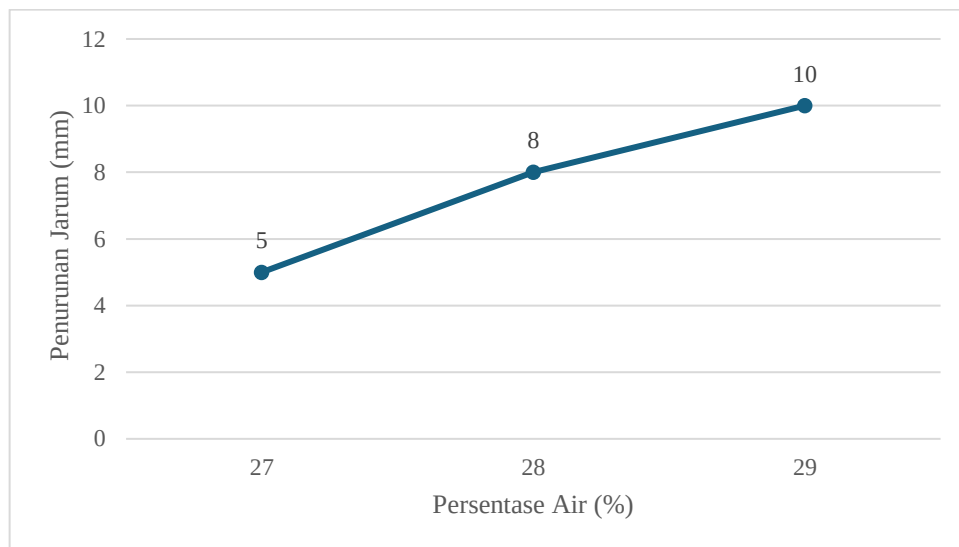
a) Penetapan Konsistensi Normal

Tabel 4.10. Penetapan Konsistensi Normal Variasi 20%

No.	Berat Semen gram	Serbuk Keramik gram	Persentase Air %	Penurunan Jarum mm	Suhu °C	Keterangan
1.	240	60	27	5	25	CWP 20%
2.	240	60	28	8	25	CWP 20%
3.	240	60	29	10	25	CWP 20%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026



Grafik 4.10. Konsistensi Normal V4

Berdasarkan data **Tabel 4.10** dan **Grafik 4.10**, pengujian konsistensi normal semen variasi 20% dengan campuran semen Gresik PCC sebanyak 240 gram dan serbuk limbah keramik sebanyak 60 gram pada suhu 25 °C dengan tiga variasi persentase kadar air (27% ; 28% ; 29%). Hasil menunjukkan bahwa semakin besar persentase air yang digunakan, berakibat pada nilai penurunan jarum vicat semakin meningkat. Penentuan persentase ini digunakan untuk mengetahui kadar air yang seharusnya digunakan dalam pengujian waktu ikat.

Merujuk pada SNI 2049:2015, nilai konsistensi normal semen tercapai ketika penurunan jarum tepat (10 ± 1) mm dalam waktu 30 detik setelah dilepaskan. Adapun hasil data pengujian menunjukkan nilai konsistensi normal semen variasi 20% adalah 29%. Persentase nilai tersebut menandakan pasta semen memiliki konsistensi yang ideal untuk pengujian waktu ikat dan sudah memenuhi standar SNI yang berlaku.

b) Penentuan Waktu Ikat Awal

Tabel 4.11. Penentuan Waktu Ikat Awal Variasi 20%

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	0	47	25	CWP 20%
2	15	46	25	CWP 20%
3	30	46	25	CWP 20%
4	45	46	25	CWP 20%
5	60	46	25	CWP 20%
6	75	46	25	CWP 20%
7	90	46	25	CWP 20%
8	105	39	25	CWP 20%
9	120	39	25	CWP 20%
10	135	35	25	CWP 20%
11	150	27	25	CWP 20%
12	165	22	25	CWP 20%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026

Waktu ikat awal = 156 menit

Interpolasi :

$$\begin{aligned}
 Y &= Y_1 + \frac{(X-X_1)}{(X_2-X_1)} \times (Y_2 - Y_1) \\
 &= 150 + \frac{(25-27)}{(22-27)} \times (165 - 150) \\
 &= 150 + \frac{2}{5} \times 15 \\
 &= 156 \text{ menit}
 \end{aligned}$$

Keterangan :

Y = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum di angka 25 mm

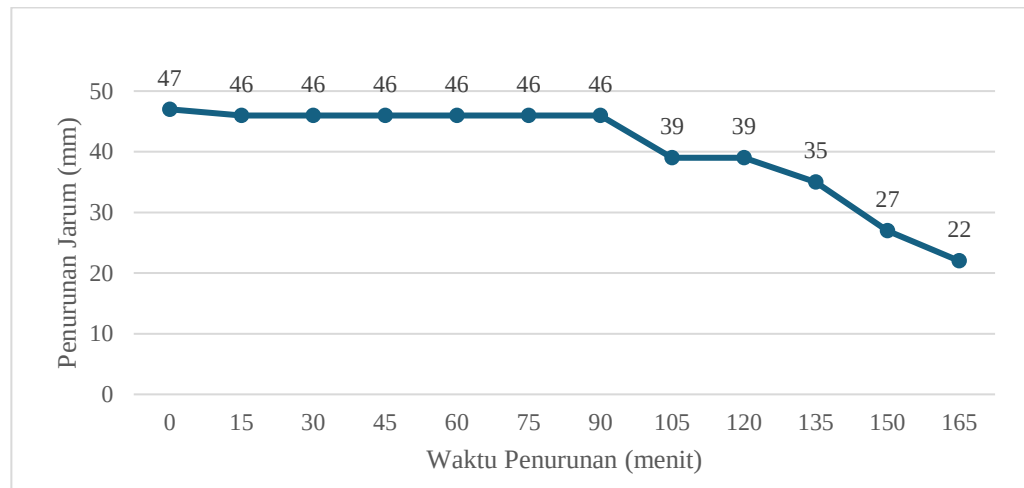
X = Penurunan jarum di angka 25 mm

X1 = Penurunan jarum di angka 27 mm

X2 = Penurunan jarum di angka 22 mm

Y1 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 27 mm

Y2 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 22 mm



Grafik 4.11. Waktu Ikut Awal V4

Berdasarkan **Tabel 4.11** dan **Grafik 4.11**, pengujian waktu ikat awal pada campuran semen dengan substitusi serbuk limbah keramik dengan kadar lebih tinggi sebesar 20% serta menggunakan kadar air hasil konsistensi normal (29%). Penentuan waktu ikat awal diukur berdasarkan waktu yang dibutuhkan hingga jarum vicat mencapai penurunan (25 ± 1) mm sesuai SNI 2049:2015.

Hasil data pengujian menunjukkan pengerasan pasta semen stabil dalam waktu yang cukup panjang pada menit-menit awal. Dengan penurunan antara 0 – 90 menit adalah 47 – 46 mm, dimana kondisi ini menunjukkan tingkat plastisitas pasta semen masih tinggi. Penurunan bertahap terlihat saat pada 105 – 120 menit yang menunjukkan pengikatan awal secara perlahan dengan penurunan 39 mm. Kemudian proses pengerasan berjalan dinamis dengan penurunan 35 mm pada 135 menit, lalu menjadi 27 mm pada 150 menit hingga mencapai penurunan 22 mm pada waktu 165 menit.

Karena standar SNI untuk pengikatan awal adalah (25 ± 1) mm, maka letak hasil 25 mm ada pada rentang 150 – 165 menit. Berdasarkan hasil perhitungan

interpolasi menunjukkan nilai pengikatan awal semen variasi 20% adalah pada 156 menit. Waktu yang diperoleh tetap memenuhi standar syarat mutu semen dengan ketentuan waktu yang dibutuhkan paling cepat minimal 45 menit, karena pasta semen tidak mengalami pengikatan terlalu cepat sehingga memberikan waktu pengerjaan yang cukup untuk pencetakan.

4.1.2.1.6. Pengujian Waktu Ikat Variasi 25%

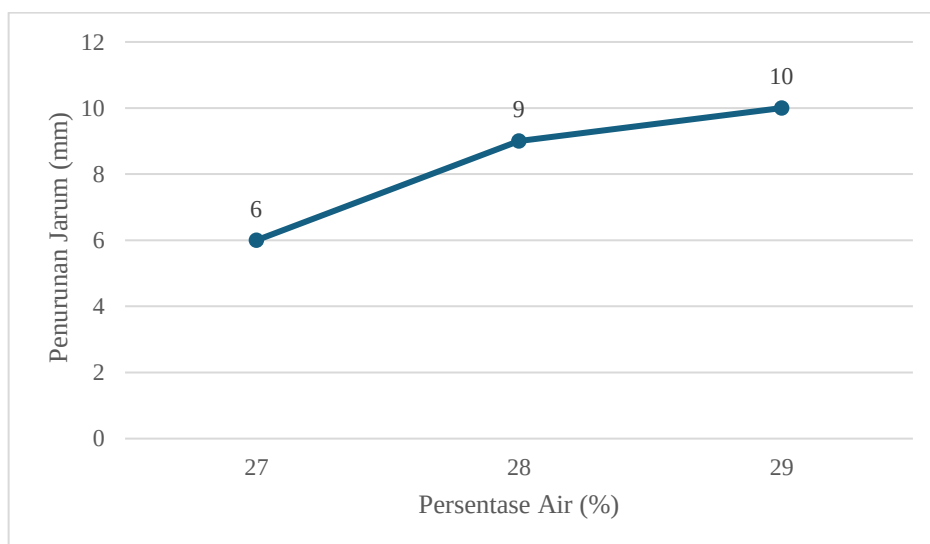
a) Penetapan Konsistensi Normal

Tabel 4.12. Penetapan Konsistensi Normal Variasi 25%

No.	Berat Semen gram	Serbuk Keramik gram	Persentase Air %	Penurunan Jarum mm	Suhu °C	Keterangan
1.	225	75	27	6	25	CWP 25%
2.	225	75	28	9	25	CWP 25%
3.	225	75	29	10	25	CWP 25%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026



Grafik 4.12. Konsistensi Normal V5

Berdasarkan data **Tabel 4.12** dan **Grafik 4.12**, pengujian konsistensi normal semen variasi 25% dengan campuran semen Gresik PCC sebanyak 225

gram dan serbuk limbah keramik sebanyak 75 gram pada kondisi suhu ruang 25 °C. Digunakan tiga variasi persentase kadar air (27% ; 28% ; 29%) dan hasil menunjukkan bahwa pasta semen semakin encer seiring dengan semakin besar persentase air yang digunakan.

Penentuan persentase ini digunakan untuk mengetahui kadar air yang seharusnya digunakan dalam pengujian waktu ikat. Mengacu pada ketentuan SNI 2049:2015, pasta semen mencapai nilai konsistensi normal semen ketika penurunan jarum tepat (10 ± 1) mm dalam waktu 30 detik setelah dilepaskan. Sesuai hasil data pengujian, penurunan 10 mm didapatkan dengan kadar air 29%. Persentase nilai tersebut menandakan pasta semen memiliki konsistensi yang ideal untuk pengujian waktu ikat dan sudah memenuhi standar SNI yang berlaku.

b) Penentuan Waktu Ikat Awal

Tabel 4.13. Penentuan Waktu Ikat Awal Variasi 25%

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	0	43	25	CWP 25%
2	15	43	25	CWP 25%
3	30	42	25	CWP 25%
4	45	42	25	CWP 25%
5	60	42	25	CWP 25%
6	75	41	25	CWP 25%
7	90	41	25	CWP 25%
8	105	40	25	CWP 25%
9	120	37	25	CWP 25%
10	135	35	25	CWP 25%
11	150	33	25	CWP 25%
12	165	29	25	CWP 25%
13	180	23	25	CWP 25%

Keterangan : CWP = *Ceramic Powder Waste*

Sumber: Hasil Pengujian, 2026

Waktu ikat awal = 175 menit

Interpolasi :

$$\begin{aligned}
 Y &= Y1 + \frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \times (Y2 - Y1) \\
 &= 165 + \frac{(25-29)}{(23-29)} \times (180 - 165) \\
 &= 165 + \frac{4}{6} \times 15 \\
 &= 175 \text{ menit}
 \end{aligned}$$

Keterangan :

Y = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum di angka 25 mm

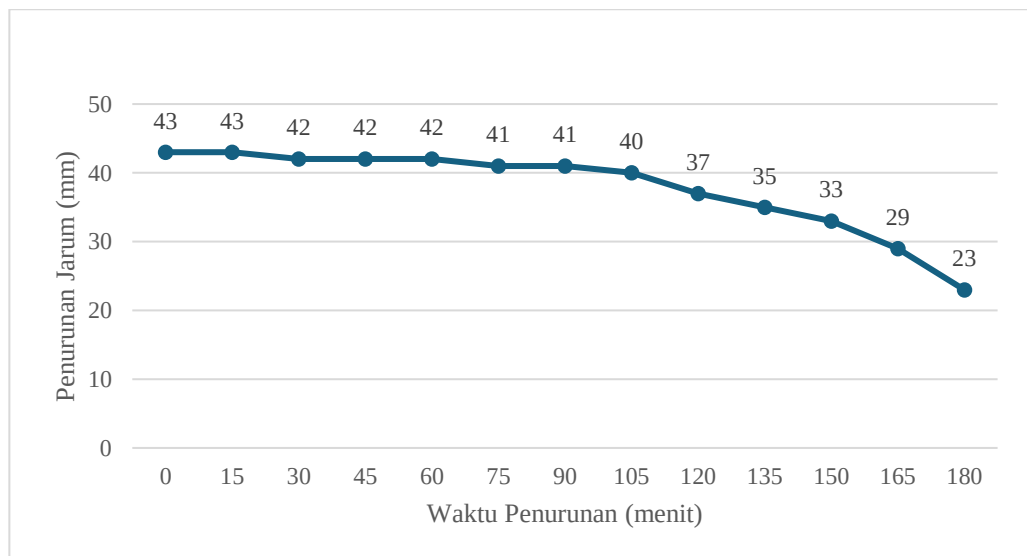
X = Penurunan jarum di angka 25 mm

X1 = Penurunan jarum di angka 29 mm

X2 = Penurunan jarum di angka 23 mm

Y1 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 29 mm

Y2 = Waktu yang dibutuhkan untuk penurunan jarum berada di angka 23 mm



Grafik 4.13. Waktu Ikut Awal V5

Berdasarkan **Tabel 4.13** dan **Grafik 4.13**, pengujian waktu ikat awal pada campuran semen dengan substitusi serbuk limbah keramik dengan kadar lebih

tinggi sebesar 20% serta menggunakan kadar air hasil konsistensi normal (29%). Penentuan waktu ikat awal diukur berdasarkan waktu yang dibutuhkan hingga jarum vicat mencapai penurunan (25 ± 1) mm sesuai SNI 2049:2015.

Hasil data pengujian pada fase awal pengerjaan yaitu 0 – 105 menit pasta semen memiliki tingkat keenceran yang cenderung stabil ditandai dengan penurunan antara 43 – 40 mm. Pasta semen mulai mengeras setelah 120 menit dengan penurunan 37 mm, lalu menurun ke 35 mm pada 135 menit dan menjadi 33 mm pada 150 menit. Kemudian mengeras lebih cepat sampai penurunan 29 mm pada 165 menit dan akhirnya mencapai 23 mm pada 180 menit.

Sesuai ketentuan SNI untuk pengikatan awal adalah (25 ± 1) mm, maka letak hasil 25 mm ada pada rentang 165 – 180 menit. Berdasarkan hasil perhitungan interpolasi menunjukkan nilai pengikatan awal semen variasi 25% adalah pada 175 menit. Waktu yang diperoleh tetap memenuhi standar syarat mutu semen dengan ketentuan waktu yang dibutuhkan paling cepat minimal 45 menit, karena pasta semen tidak mengalami pengikatan terlalu cepat sehingga memberikan waktu pengerjaan yang cukup untuk pencetakan.

4.1.3. Pengujian Serbuk Keramik

4.1.3.1. Pengujian Berat Jenis

Hasil pengujian berat jenis berpedoman pada ASTM C128 dan SNI 1970:2008, didapatkan data sebagai berikut:

- Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD) = 200 gram
- Berat kering oven = 193,9 gram
- Berat piknometer diisi air = 666 gram
- Berat piknometer + benda uji SSD + air = 793,3 gram

1. Berat Jenis Permukaan Jenuh (SSD)

$$\begin{aligned}
 BJ &= \frac{200}{(B + 200 - Bt)} \\
 &= \frac{200}{(666 + 200 - 793,3)} \\
 &= 2,751 \text{ gr/cm}^3
 \end{aligned}$$

2. Penyerapan (*Absorption*)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(200 - BK)}{BK} \times 100\% \\
 &= \frac{(200 - 193,9)}{193,9} \times 100\% \\
 &= 3,15\%
 \end{aligned}$$

4.2. Kebutuhan Material *Job Mix Design*Tabel 4.14. *Job Mix* Penelitian

Kode Sampel	Semen	Pasir	Fiberglass	Serbuk Keramik	FAS
	%	%	%	%	
V0	39	59	2	0	0,4
V1	34	59	2	5	0,4
V2	29	59	2	10	0,4
V3	24	59	2	15	0,4
V4	19	59	2	20	0,4
V5	14	59	2	25	0,4

Berikut merupakan perhitungan kebutuhan material penyusun plafon GRC:

Tabel 4.15. Kebutuhan Material Setiap Variasi

Variasi	Bahan				
	Semen	Pasir	Fiberglass	Serbuk Keramik	Air
V0 (Konvensional)	49,14 gr	64,73 gr	1,44 gr	0 gr	19,66 ml
V1 (Substitusi 5%)	46,68 gr	64,73 gr	1,44 gr	2,15 gr	19,53 ml
V2 (Substitusi 10%)	44,23 gr	64,73 gr	1,44 gr	4,29 gr	19,41 ml
V3 (Substitusi 15%)	41,77 gr	64,73 gr	1,44 gr	6,44 gr	19,28 ml
V4 (Substitusi 20%)	39,31 gr	64,73 gr	1,44 gr	8,58 gr	19,16 ml
V5 (Substitusi 25%)	36,85 gr	64,73 gr	1,44 gr	10,73 gr	19,03 ml

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Perhitungan perencanaan *mix design* menggunakan benda uji sebagai berikut :

- Volume benda uji balok = $10 \times 10 \times 0,4 \text{ cm} = 40 \text{ cm}^3$
- Volume benda uji balok = $5 \times 20 \times 0,4 \text{ cm} = 40 \text{ cm}^3$

a. Variasi 0% (Konvensional)

Tabel 4.16. Perhitungan *Mix Design* Variasi 0%

Perhitungan Variasi 0%	
- Semen (berat jenis = $3,15 \text{ gr/cm}^3$)	$= 39\% \times \text{volume benda uji}$ $= 0,39 \times 40$ $= 15,6 \text{ cm}^3$
Berat semen	$= 15,6 \text{ cm}^3 \times 3,15 \text{ gr/cm}^3$ $= 49,14 \text{ gr}$

Perhitungan Variasi 0%	
- Pasir (berat jenis = 2,743 gr/cm ³)	= 59% × volume benda uji = 0,59 × 40 = 23,6 cm ³
Berat pasir	= 23,6 cm ³ × 2,743 gr/cm ³ = 64,73 gr
- <i>Fiberglass</i> (berat jenis = 1,8 gr/cm ³)	= 2% × volume benda uji = 0,02 × 40 = 0,8 cm ³
Berat	= 0,8 cm ³ × 1,8 gr/cm ³ = 1,44 gr
- Air (0,4)	= 0,4 × berat semen = 0,4 × 49,14 = 19,66 ml

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

b. Variasi 5%

Tabel 4.17. Perhitungan *Mix Design* Variasi 5%

Perhitungan Variasi 5%	
- Semen (berat jenis = 3,15 gr/cm ³)	= 39% × volume benda uji = 0,39 × 40 = 15,6 cm ³
Berat semen	= 95% × 15,6 cm ³ × bj semen = 14,82 cm ³ × 3,15 gr/cm ³ = 46,68 gr
- Serbuk keramik (berat jenis = 2,751 gr/cm ³)	= 5% × 15,6 cm ³ = 0,78 cm ³
Berat	= 0,78 cm ³ × 2,751 gr/cm ³ = 2,15 gr
- Pasir (berat jenis = 2,743 gr/cm ³)	= 59% × volume benda uji = 0,59 × 40 = 23,6 cm ³
Berat pasir	= 23,6 cm ³ × 2,743 gr/cm ³ = 64,73 gr

Perhitungan Variasi 5%	
- <i>Fiberglass</i> (berat jenis = 1,8 gr/cm ³)	= 2% × volume benda uji = 0,02 × 40 = 0,8 cm ³
Berat	= 0,8 cm ³ × 1,8 gr/cm ³ = 1,44 gr
- Air (0,4)	= 0,4 × (berat semen + berat keramik) = 0,4 × 48,83 = 19,53 ml

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

c. Variasi 10%

Tabel 4.18. Perhitungan *Mix Design* Variasi 10%

Perhitungan Variasi 10%	
- Semen (berat jenis = 3,15 gr/cm ³)	= 39% × volume benda uji = 0,39 × 40 = 15,6 cm ³
Berat semen	= 90% × 15,6 cm ³ × bj semen = 14,04 cm ³ × 3,15 gr/cm ³ = 44,23 gr
- Serbuk keramik (berat jenis = 2,751 gr/cm ³)	= 10% × 15,6 cm ³ = 1,56 cm ³
Berat	= 1,56 cm ³ × 2,751 gr/cm ³ = 4,29 gr
- Pasir (berat jenis = 2,743 gr/cm ³)	= 59% × volume benda uji = 0,59 × 40 = 23,6 cm ³
Berat pasir	= 23,6 cm ³ × 2,743 gr/cm ³ = 64,73 gr
- <i>Fiberglass</i> (berat jenis = 1,8 gr/cm ³)	= 2% × volume benda uji = 0,02 × 40 = 0,8 cm ³
Berat	= 0,8 cm ³ × 1,8 gr/cm ³ = 1,44 gr

Perhitungan Variasi 10%	
- Air (0,4)	$= 0,4 \times (\text{berat semen} + \text{berat keramik})$ $= 0,4 \times 48,52$ $= 19,41 \text{ ml}$

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

d. Variasi 15%

Tabel 4.19. Perhitungan *Mix Design* Variasi 15%

Perhitungan Variasi 15%	
- Semen (berat jenis = 3,15 gr/cm ³)	$= 39\% \times \text{volume benda uji}$ $= 0,39 \times 40$ $= 15,6 \text{ cm}^3$
Berat semen	$= 85\% \times 15,6 \text{ cm}^3 \times \text{bj semen}$ $= 13,26 \text{ cm}^3 \times 3,15 \text{ gr/cm}^3$ $= 41,77 \text{ gr}$
- Serbuk keramik (berat jenis = 2,751 gr/cm ³)	$= 15\% \times 15,6 \text{ cm}^3$ $= 2,34 \text{ cm}^3$
Berat	$= 2,34 \text{ cm}^3 \times 2,751 \text{ gr/cm}^3$ $= 6,44 \text{ gr}$
- Pasir (berat jenis = 2,743 gr/cm ³)	$= 59\% \times \text{volume benda uji}$ $= 0,59 \times 40$ $= 23,6 \text{ cm}^3$
Berat pasir	$= 23,6 \text{ cm}^3 \times 2,743 \text{ gr/cm}^3$ $= 64,73 \text{ gr}$
- <i>Fiberglass</i> (berat jenis = 1,8 gr/cm ³)	$= 2\% \times \text{volume benda uji}$ $= 0,02 \times 40$ $= 0,8 \text{ cm}^3$
Berat	$= 0,8 \text{ cm}^3 \times 1,8 \text{ gr/cm}^3$ $= 1,44 \text{ gr}$
- Air (0,4)	$= 0,4 \times (\text{berat semen} + \text{berat keramik})$ $= 0,4 \times 48,21$ $= 19,28 \text{ ml}$

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

e. Variasi 20%

Tabel 4.20. Perhitungan *Mix Design* Variasi 20%

Perhitungan Variasi 20%		
- Semen	= 39% × volume benda uji	
(berat jenis semen = 3,15 gr/cm ³)	= 0,39 × 40	
	= 15,6 cm ³	
Berat semen	= 80% × 15,6 cm ³ × bj semen	
	= 12,48 cm ³ × 3,15 gr/cm ³	
	= 39,31 gr	
- Serbuk keramik	= 20% × 15,6 cm ³	
(berat jenis = 2,751 gr/cm ³)	= 3,12 cm ³	
Berat	= 3,12 cm ³ × 2,751 gr/cm ³	
	= 8,58 gr	
- Pasir	= 59% × volume benda uji	
(berat jenis = 2,743 gr/cm ³)	= 0,59 × 40	
	= 23,6 cm ³	
Berat pasir	= 23,6 cm ³ × 2,743 gr/cm ³	
	= 64,73 gr	
- <i>Fiberglass</i>	= 2% × volume benda uji	
(berat jenis = 1,8 gr/cm ³)	= 0,02 × 40	
	= 0,8 cm ³	
Berat	= 0,8 cm ³ × 1,8 gr/cm ³	
	= 1,44 gr	
- Air (0,4)	= 0,4 × (berat semen + berat keramik)	
	= 0,4 × 47,89	
	= 19,16 ml	

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

f. Variasi 25%

Tabel 4.21. Perhitungan *Mix Design* Variasi 25%

Perhitungan Variasi 25%		
- Semen	= 39% × volume benda uji	
(berat jenis semen = 3,15 gr/cm ³)	= 0,39 × 40	
	= 15,6 cm ³	

Perhitungan Variasi 25%	
Berat semen	$= 75\% \times 15,6 \text{ cm}^3 \times \text{bj semen}$ $= 11,7 \text{ cm}^3 \times 3,15 \text{ gr/cm}^3$ $= 36,85 \text{ gr}$
- Serbuk keramik (berat jenis = $2,751 \text{ gr/cm}^3$)	$= 25\% \times 15,6 \text{ cm}^3$ $= 3,9 \text{ cm}^3$
Berat	$= 3,9 \text{ cm}^3 \times 2,751 \text{ gr/cm}^3$ $= 10,73 \text{ gr}$
- Pasir (berat jenis = $2,743 \text{ gr/cm}^3$)	$= 59\% \times \text{volume benda uji}$ $= 0,59 \times 40$ $= 23,6 \text{ cm}^3$
Berat pasir	$= 23,6 \text{ cm}^3 \times 2,743 \text{ gr/cm}^3$ $= 64,73 \text{ gr}$
- <i>Fiberglass</i> (berat jenis = $1,8 \text{ gr/cm}^3$)	$= 2\% \times \text{volume benda uji}$ $= 0,02 \times 40$ $= 0,8 \text{ cm}^3$
Berat	$= 0,8 \text{ cm}^3 \times 1,8 \text{ gr/cm}^3$ $= 1,44 \text{ gr}$
- Air (0,4)	$= 0,4 \times (\text{berat semen} + \text{berat keramik})$ $= 0,4 \times 47,58$ $= 19,03 \text{ ml}$

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

4.3. Data dan Perhitungan Hasil Pengujian

Berikut adalah data yang diperoleh saat melaksanakan uji kerapatan, uji kuat lentur, dan uji penyerapan air yang dilakukan di laboratorium.

4.3.1. Pengukuran Dimensi

Berdasarkan pengukuran dimensi benda uji yang dibuat, berikut hasil dari pemeriksaan dimensi dari benda uji ukuran $10 \times 10 \times 0,4 \text{ cm}$ dan $5 \times 20 \times 0,4 \text{ cm}$. Pemeriksaan dimensi dilakukan dengan mengacu pada SNI 01-4449-2006 yang menetapkan toleransi dimensi panjang dan lebar sebesar $\pm 0,4 \text{ cm}$, serta toleransi ketebalan sebesar $\pm 0,5 \text{ mm}$. Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan ketentuan toleransi tersebut untuk mengetahui sesesuaian dimensi benda uji yang telah dibuat.

Tabel 4.22. Data Pengukuran Dimensi Benda Uji $10 \times 10 \times 0,4$ cm

Sampel	Kode Sampel	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tebal (cm)	Keterangan
Kontrol 0%	A1	9,996	10,000	0,440	Memenuhi syarat
	A2	10,002	10,000	0,438	
	A3	10,000	9,997	0,443	
Variasi 5%	B1	9,980	9,972	0,439	Memenuhi syarat
	B2	9,987	9,987	0,441	
	B3	9,968	10,064	0,431	
Variasi 10%	C1	9,985	10,000	0,432	Memenuhi syarat
	C2	10,025	10,062	0,431	
	C3	9,981	9,990	0,441	
Variasi 15%	D1	10,010	10,024	0,436	Memenuhi syarat
	D2	9,940	10,006	0,445	
	D3	9,985	10,005	0,425	
Variasi 20%	E1	9,962	9,995	0,437	Memenuhi syarat
	E2	10,061	9,978	0,445	
	E3	9,990	10,000	0,441	
Variasi 25%	F1	9,991	10,024	0,439	Memenuhi syarat
	F2	9,867	9,867	0,438	
	F3	10,207	9,972	0,431	

Sumber: Hasil Pengukuran, 2026

Data hasil pengukuran pada **Tabel 4.22** menunjukkan hasil pengujian dimensi pada seluruh sampel benda uji dari V0 – V5 dengan ukuran rencana $10 \times 10 \times 0,4$ cm. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa untuk panjang dan lebar memiliki selisih yang sangat tipis dari ukuran awal. Namun, masih berada dalam batas toleransi ukuran yang diizinkan SNI. Untuk parameter tebal benda uji, seluruh sampel masih memenuhi standar toleransi ketebalan $\pm 0,5$ mm. Adanya kelebihan tebal dipicu oleh faktor pemerataan permukaan adonan, meskipun demikian seluruh dimensi benda uji masih memenuhi syarat SNI yang diizinkan.

Tabel 4.23. Data Pengukuran Dimensi Benda Uji $5 \times 20 \times 0,4$ cm

Sampel	Kode Sampel	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tebal (cm)	Keterangan
Kontrol 0%	A1	20,160	5,038	0,431	Memenuhi syarat
	A2	20,007	4,997	0,426	
	A3	19,961	4,970	0,417	
Variasi 5%	B1	20,015	5,004	0,418	Memenuhi syarat
	B2	20,032	5,010	0,431	
	B3	20,002	5,013	0,420	
Variasi 10%	C1	20,003	5,024	0,400	Memenuhi syarat
	C2	20,152	4,993	0,412	
	C3	19,995	5,003	0,421	
Variasi 15%	D1	20,040	4,995	0,443	Memenuhi syarat
	D2	20,070	5,002	0,446	
	D3	20,010	5,007	0,429	
Variasi 20%	E1	20,060	5,052	0,428	Memenuhi syarat
	E2	20,051	4,994	0,423	
	E3	20,004	4,982	0,410	
Variasi 25%	F1	19,975	5,046	0,435	Memenuhi syarat
	F2	20,026	4,991	0,443	
	F3	20,039	5,083	0,436	

Sumber: Hasil Pengukuran, 2026

Data hasil pengukuran pada **Tabel 4.23** menunjukkan hasil pengujian dimensi pada seluruh sampel benda uji dari V0 – V5 dengan ukuran rencana $5 \times 20 \times 0,4$ cm. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa untuk panjang dan lebar memiliki selisih yang sangat tipis dari ukuran awal. Namun, masih berada dalam batas toleransi ukuran yang diizinkan SNI. Untuk parameter tebal benda uji, seluruh sampel masih memenuhi standar toleransi ketebalan $\pm 0,5$ mm. Adanya kelebihan tebal dipicu oleh faktor pemerataan permukaan adonan, meskipun demikian seluruh dimensi benda uji masih memenuhi syarat SNI yang diizinkan.

4.3.2. Pengujian Kerapatan

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian kerapatan, perhitungan untuk menentukan nilai kerapatan masing-masing sampel uji ada pada **Tabel 4.24** berikut:

Tabel 4.24. Data Perhitungan Uji Kerapatan

Sampel	Kode Sampel	Berat	Volume	Kerapatan	Rata-rata	Standar SNI 01-4449- 2006
		(gr)	(cm ³)	(gr/ cm ³)	(gr/ cm ³)	
Kontrol 0%	A1	89,0	44,98	1,979	1,968	> 0,84 gr/ cm ³
	A2	83,5	43,01	1,941		
	A3	87,3	43,99	1,985		
Variasi 5%	B1	87,2	43,79	1,991	1,983	
	B2	88,8	43,89	2,023		
	B3	83,4	43,14	1,933		
Variasi 10%	C1	87,4	43,14	2,026	1,986	
	C2	85,6	43,48	1,969		
	C3	86,4	44,02	1,963		
Variasi 15%	D1	86,8	43,75	1,984	1,972	
	D2	84,9	44,26	1,918		
	D3	85,5	42,46	2,014		
Variasi 20%	E1	81,3	43,51	1,868	1,867	
	E2	87,2	44,67	1,952		
	E3	78,4	44,06	1,780		
Variasi 25%	F1	81,3	43,97	1,849	1,782	
	F2	72,4	42,64	1,698		
	F3	78,9	43,87	1,799		

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Nilai kerapatan di dapat dari standar pengujian SNI 01-4449-2006 dengan perhitungan berikut:

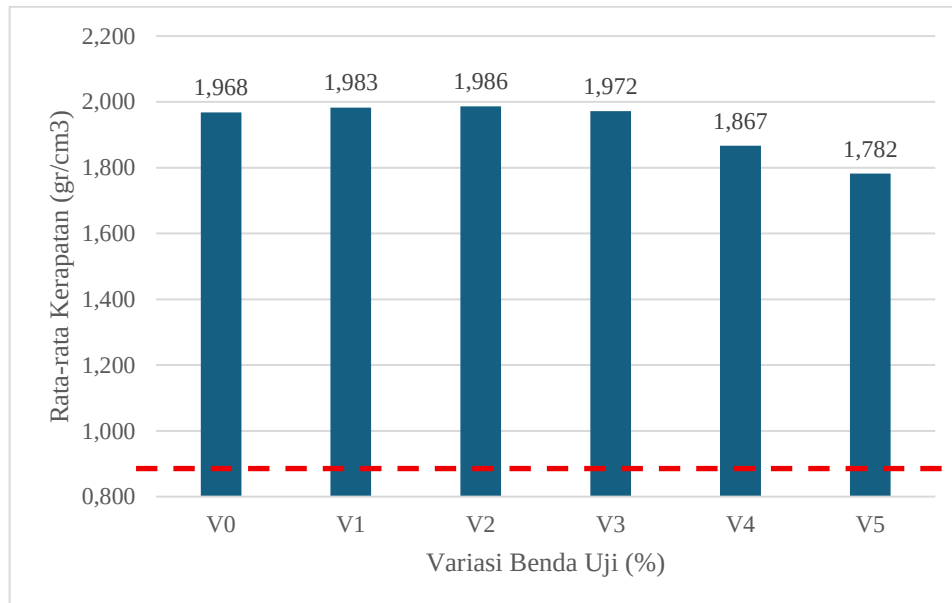
$$K = \frac{B}{I} \dots\dots\dots(4.1)$$

Keterangan :

K = Kerapatan (g/cm^3)

B = Berat (gram)

I = Volume (cm^3) = panjang x lebar x tebal



Grafik 4.14. Pengujian Kerapatan (Densitas)

Berdasarkan **Grafik 4.14** hasil uji kerapatan, dapat disimpulkan untuk nilai kerapatan benda uji dari tiap variasi diperoleh bahwa pada benda uji V2 dengan substitusi 10% serbuk limbah keramik adalah papan plafon GRC inovasi dengan nilai kerapatan tertinggi $1,986 \text{ gr/cm}^3$. Sedangkan, nilai kerapatan terendah dimiliki oleh V5 dengan substitusi 25% serbuk limbah keramik yaitu sebesar $1,782 \text{ gr/cm}^3$. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan serbuk limbah keramik dengan persentase yang terlalu tinggi akan menurunkan densitas karena menimbulkan *loosening effect*, dimana partikel halus mendorong butiran yang lebih besar sehingga terbentuk rongga baru dan menurunkan kepadatan material (Chen & Guan, 2025).

Meskipun perbedaannya dari peningkatan tiap variasi mungkin terlihat kecil, namun hal ini tetap mencerminkan peran keberhasilan substitusi serta peningkatan dapat dikaitkan dengan sinergi optimal reaksi pozzolanik yang dihasilkan oleh serbuk limbah keramik. Substitusi 10% serbuk limbah keramik mampu

meningkatkan pengemasan partikel dan mengisi rongga mikro dalam matriks, sehingga nantinya dapat mengurangi porositas. Sedangkan, pada V4 dan V5 mengalami penurunan densitas yang cukup signifikan meskipun substitusi serbuk limbah keramiknya yang paling tinggi. Hal ini berkaitan dengan penambahan CWP yang berlebihan (20% - 25%) sehingga meningkatkan kemungkinan peningkatan porositas dan berdampak pada penyerapan air yang akan meningkat juga.

Adapun menurut penelitian terdahulu yang dilakukan Sapulette et al. (2024), karakteristik papan semen dengan basis gypsum-semen menunjukkan bahwa penambahan substitusi serbuk limbah keramik pada variasi 10% menghasilkan nilai kerapatan terendah sebesar $1,134 \text{ gr/cm}^3$. Namun, pada penelitian yang dilakukan penulis dengan basis pasir-semen diperoleh hasil nilai kerapatan tertinggi justru pada campuran variasi 10% serbuk limbah keramik dengan nilai kerapatan $1,986 \text{ gr/cm}^3$. Perbedaan hasil ini dapat terjadi akibat penggunaan karakteristik bahan utama yang digunakan berbeda. Selain itu, hasil tersebut juga mendukung penelitian oleh Taher et al. (2023) bahwa penambahan 10% serbuk limbah keramik dapat memberikan performa terbaik sebagai *micro-filler* yang mengisi rongga / celah diantara butiran semen. Serta perlu diketahui pula bahwa semua sampel benda uji yang digunakan memenuhi standar sesuai dengan ketentuan syarat dalam SNI 01-4449-2006 tentang Papan Serat karena memiliki nilai kerapatan $> 0,84 \text{ gr/cm}^3$. Sehingga dapat diklasifikasikan sebagai Papan Serat Kerapatan Tinggi (PSKT). Oleh karena itu, campuran yang menghasilkan keseimbangan antara densitas dan porositas paling optimal adalah pada V2 dengan substitusi 10% serbuk limbah keramik.

4.3.3. Pengujian Kuat Lentur

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian kuat lentur, dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai kuat lentur masing-masing sampel uji. Berikut **Tabel 4.25** data hasil uji dan perhitungan pada masing-masing benda uji:

Tabel 4.25. Data Perhitungan Uji Kuat Lentur

Sampel	Kode Sampel	Lebar (cm)	Tebal (cm)	Jarak Sanggah (cm)	Beban Maksimum Sampel (KN)	Beban Maksimum Sampel (kgf)	Kuat Lentur (kgf/cm ²)	Kuat Lentur rata-rata (kgf/cm ²)	Konversi (N/mm ²)	Standar SNI 01-4449-2006					
Kontrol 0%	A1	5,038	0,431	15	0,140	14,28	343,218	289,941	28,434	≥ 20,0 N/mm ² atau ≥ 204 kgf/cm ²					
	A2	4,997	0,426	15	0,120	12,24	303,604								
	A3	4,970	0,417	15	0,084	8,57	223,000								
Variasi 5%	B1	5,004	0,418	15	0,140	14,28	367,378	333,068	32,663		≥ 20,0 N/mm ² atau ≥ 204 kgf/cm ²				
	B2	5,010	0,431	15	0,130	13,26	320,484								
	B3	5,013	0,420	15	0,120	12,24	311,344								
Variasi 10%	C1	5,024	0,400	15	0,120	12,24	342,505	343,594	33,696			≥ 20,0 N/mm ² atau ≥ 204 kgf/cm ²			
	C2	4,993	0,412	15	0,130	13,26	351,919								
	C3	5,003	0,421	15	0,130	13,26	336,359								
Variasi 15%	D1	4,995	0,443	15	0,155	15,81	362,780	313,368	30,731				≥ 20,0 N/mm ² atau ≥ 204 kgf/cm ²		
	D2	5,002	0,446	15	0,110	11,22	253,650								
	D3	5,007	0,429	15	0,130	13,26	323,673								
Variasi 20%	E1	5,052	0,428	15	0,060	6,12	148,749	262,443	25,737					≥ 20,0 N/mm ² atau ≥ 204 kgf/cm ²	
	E2	4,994	0,423	15	0,110	11,22	282,435								
	E3	4,982	0,410	15	0,130	13,26	356,145								
Variasi 25%	F1	5,046	0,435	15	0,080	8,16	192,229	182,051	17,853						≥ 20,0 N/mm ² atau ≥ 204 kgf/cm ²
	F2	4,991	0,443	15	0,070	7,14	163,968								
	F3	5,083	0,436	15	0,080	8,16	189,955								

Nilai kuat lentur diperoleh dari standar pengujian SNI 01-4449-2006 dengan perhitungan berikut:

$$KLMP = \frac{3BS}{2LT^2} \dots\dots\dots(4.2)$$

Keterangan :

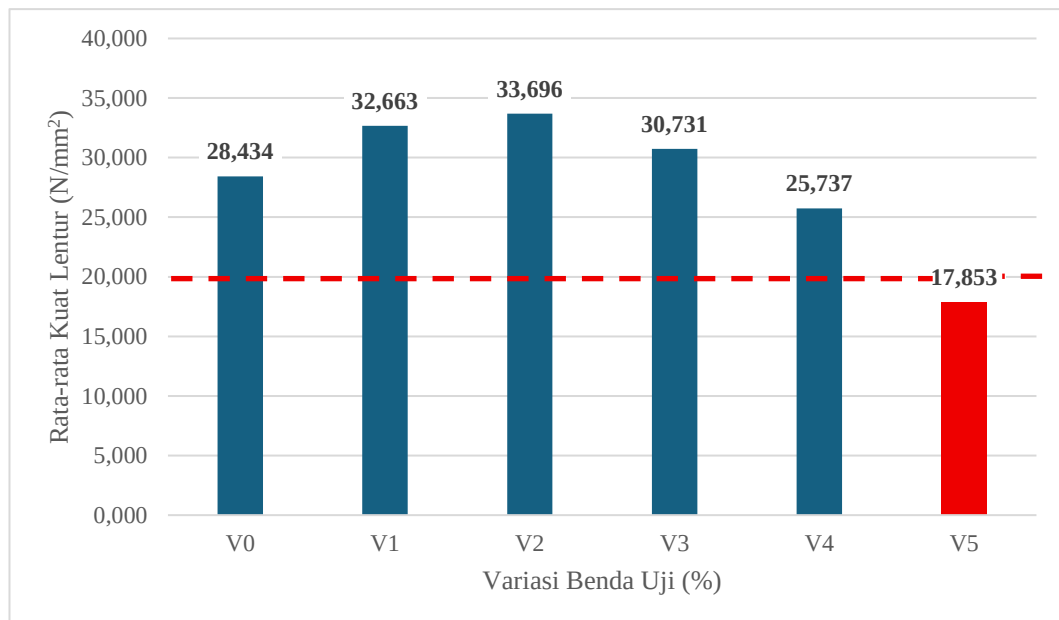
KLMP = Modulus Lentur (kgf/cm^2)

S = Jarak Sangga (cm)

B = Beban Maksimum (kgf)

L = Lebar Benda Uji (cm)

T = Tebal Benda Uji (cm)



Grafik 4.15. Pengujian Kuat Lentur

Berdasarkan **Grafik 4.15** hasil uji kuat lentur, dapat disimpulkan untuk nilai kuat lentur benda uji dari tiap variasi diperoleh bahwa pada benda uji V2 dengan substitusi 10% serbuk limbah keramik merupakan papan plafon GRC inovasi dengan nilai kuat lentur tertinggi senilai $33,696 \text{ N/mm}^2$ atau dalam kilogram-force adalah $343,594 \text{ kgf/cm}^2$.

Secara mekanis dan kimiawi material, peningkatan kuat lentur dipicu oleh peningkatan densifikasi (pemadatan) matriks semen. Serbuk limbah keramik yang

memiliki kandungan *silika* dan *alumina* tinggi berperan aktif sebagai pengikat sekunder melalui reaksi pozzolanik. Senyawa tersebut bereaksi dengan *kalsium hidroksida* guna membentuk gel *kalsium silikat hidrat* (C-S-H) (Murali et al., 2025). Reaksi hidrasi sekunder tidak hanya meningkatkan konsentrasi pengikat tetapi juga mengisi pori-pori mikro sehingga struktur papan semen menjadi lebih padat dan mampu menahan retak secara optimal di bawah tekanan. Hal ini sejalan dengan temuan Lasseguette et al. (2019) dan Murali et al. (2025) yang menyatakan bahwa aktivitas pozzolanik dari serbuk limbah keramik bekerja paling efektif pada rentang 5% - 10% untuk menghasilkan struktur mikro yang lebih kuat.

Meskipun demikian, hasil penelitian ini cukup bertolak belakang dengan hasil penelitian terdahulu oleh Sapulette et al. (2024) yang mengatakan kuat lentur terendah ada pada substitusi 10% serbuk limbah keramik. Perbedaan hasil ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik material penyusun, ukuran butiran serbuk limbah keramik, serta dimensi benda uji selama pengujian.

Di sisi lain, penurunan nilai kuat lentur secara drastis terjadi pada penambahan serbuk limbah keramik di atas batas optimum. Nilai kuat lentur terendah diperoleh V5 dengan substitusi 25% serbuk limbah keramik dengan nilai sebesar 17,853 N/mm² atau 182,051 kgf/cm². Penurunan ini mengindikasikan bahwa jumlah substitusi yang berlebihan dapat mengurangi volume semen murni secara signifikan sehingga akan terjadi penurunan kualitas hidrasi dan kekuatan mekanis papan komposit. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Chen & Guan (2025) yang menyatakan pasta semen berfungsi sebagai pengikat utama, reduksi volumenya akibat substitusi serbuk limbah keramik yang terlalu tinggi secara otomatis akan menurunkan kekuatan lentur.

Selain dari faktor kimiawi semen, beberapa aspek fisik juga dapat menjadi penyebab penurunan kelenturan antara lain ikatan antarpartikel dan terbentuknya rongga di dalam papan. Performa penurunan lentur dapat diperparah jika susunan serat tidak merata serta proses pengepresan (*pressing*) yang kurang tepat selama fase pengeringan. Akibatnya transfer tegangan dalam matriks tidak bekerja secara optimal ketika menerima beban lentur.

Apabila dievaluasi berdasarkan syarat standar SNI 01-4449-2006 tentang Papan Serat, benda uji V0 sampai V4 dapat diklasifikasikan sebagai Papan Serat Kerapatan Tinggi (PSKT). Namun, V5 (substitusi 25%) tidak dapat diklasifikasikan sebagai PSKT karena nilai kuat lentur ($182,051 \text{ kgf/cm}^2$ atau $17,853 \text{ N/mm}^2$) yang masih dibawah standar minimum yang disyaratkan. Berdasarkan seluruh data hasil pengujian kuat lentur di atas, maka dapat disimpulkan bahwa substitusi parsial semen dengan serbuk limbah keramik pada pembuatan papan komposit (plafon) dapat dilakukan secara efektif sampai batas optimal 10%.

4.3.4. Pengujian Penyerapan Air

Berdasarkan pengujian penyerapan air terhadap benda uji, maka dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai rata-rata penyerapan dari setiap variasi. Berikut merupakan **Tabel 4.26** data hasil pengujiannya:

Tabel 4.26. Data Perhitungan Uji Penyerapan Air

Sampel	Kode Sampel	B1	B2	Penyerapan	Rata-rata Penyerapan	SNI 01-4449-2006
		(gr)	(gr)	(%)	(%)	
Kontrol 0%	A1	89,0	97,4	9,438	8,526	< 30%
	A2	83,5	89,9	7,665		
	A3	87,3	94,7	8,477		
Variasi 5%	B1	87,2	92,5	6,078	7,692	
	B2	88,8	97,4	9,685		
	B3	83,4	89,5	7,314		
Variasi 10%	C1	87,4	93,0	6,407	7,284	
	C2	85,6	90,4	5,607		
	C3	86,4	94,9	9,838		
Variasi 15%	D1	86,8	94,2	8,525	8,124	
	D2	84,9	91,8	8,127		
	D3	85,5	92,1	7,719		
Variasi 20%	E1	81,3	90,3	11,070	11,595	
	E2	87,2	96,2	10,321		
	E3	78,4	88,9	13,393		

Sampel	Kode Sampel	B1	B2	Penyerapan	Rata-rata Penyerapan	SNI 01-4449-2006
		(gr)	(gr)	(%)	(%)	
Variasi 25%	F1	81,3	92,8	14,145		
	F2	72,4	83,1	14,779	14,204	
	F3	78,9	89,7	13,688		

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Nilai penyerapan di dapat dari standar pengujian SNI 01-4449-2006 dengan perhitungan berikut:

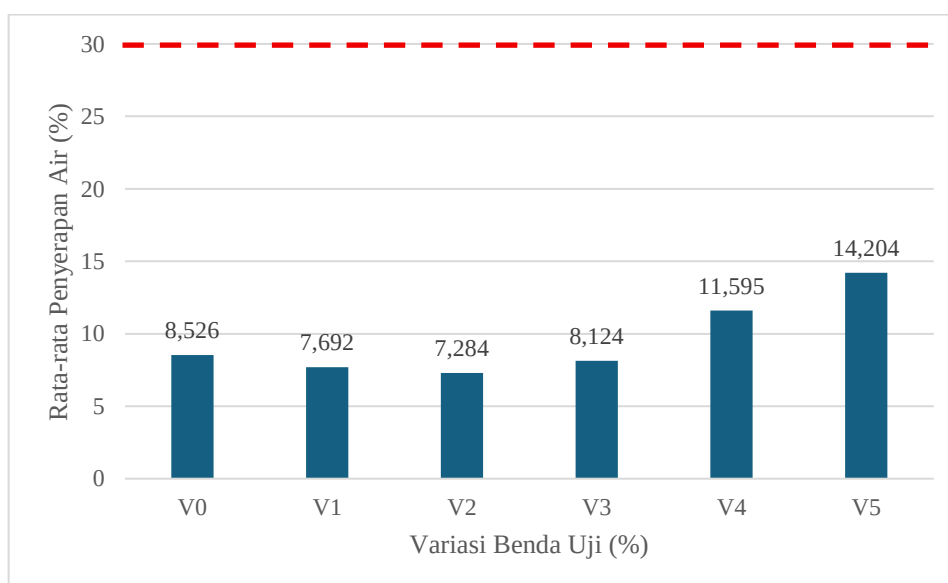
$$PA = \frac{B_2 - B_1}{B_1} \times 100 \dots\dots\dots(4.3)$$

Keterangan :

PA = Penyerapan Air (%)

B₁ = Berat Contoh Uji Sebelum Perendaman (gram)

B₂ = Berat Contoh Uji Sesudah Perendaman (gram)



Grafik 4.16. Pengujian Penyerapan Air

Berdasarkan **Grafik 4.16** hasil penyerapan air, dapat disimpulkan untuk nilai penyerapan benda uji dari tiap variasi diperoleh bahwa pada benda uji V5 dengan

substitusi 25% serbuk limbah keramik adalah papan plafon GRC inovasi dengan nilai penyerapan paling tinggi yaitu 14,202%. Sedangkan, penyerapan terendah diperoleh dari V2 substitusi 10% serbuk limbah keramik dengan nilai penyerapan sebesar 7,284%. Penyerapan air yang lebih rendah biasanya berkorelasi dengan porositas yang lebih rendah juga pengikatan partikel yang lebih padat (Zahra e al., 2026).

Analisis menunjukkan dengan substitusi serbuk limbah keramik pada kadar tertentu dapat meningkatkan resistensi air. Pada V2 menunjukkan substitusi 10% serbuk limbah keramik tampak optimal dalam mengurangi rongga dalam ikatan matriks. Partikel serbuk limbah keramik yang bertindak menjadi *micro-filler* membantu meminimalisir rongga sehingga tidak terdapat ruang untuk dilewati air. Seperti dilihat pada **Grafik 4.16** diperoleh peningkatan ketahanan terhadap air dari V0 (8,526%) menjadi pada V1 (7,692%) dan tingkat penyerapan terendah pada V2 (7,284%), hal ini menjelaskan bahwa penambahan kecil serbuk limbah keramik secara positif mampu mengurangi porositas internal papan komposit.

Namun, apabila dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang dilakukan Sapulette et al. (2024) yang dimana pada variasi 10% serbuk limbah keramik menghasilkan nilai penyerapan tertinggi yaitu 22,59% dengan bahan penyusun semen-gypsum.

Pada penelitian ini digunakan bahan penyusun semen-pasir dengan efektivitas substitusi 10% serbuk limbah keramik justru menghasilkan nilai penyerapan terendah. Hal ini juga didukung oleh Taher et al. (2023) yang mengatakan partikel halus keramik pada kadar 10% bekerja optimal sebagai *micro-filler* sehingga mengisi rongga antara butiran semen. Selain itu, menurut Le Li. et al. (2025) partikel halus dari serbuk limbah keramik dapat menyumbat pori – pori mikro yang menyebabkan jalur air terhambat. Hal ini menciptakan struktur yang lebih kedap air dan akibatnya kemampuan dalam menyerap air dapat menurun karena berkurangnya ruang yang dapat dilewati oleh air.

Adapun peningkatan penyerapan air hingga 14,202% pada V5 disebabkan oleh substitusi semen yang terlalu banyak atau diambang batas optimal dapat menyebabkan penurunan jumlah pasta semen sebagai pengikat utama dalam

campuran, sehingga berakibat pada hasil struktur yang lebih berpori dan meningkatkan penyerapan air (Murali et al., 2025). Tetapi meskipun terjadi peningkatan persentase penyerapan air pada substitusi tertinggi serbuk limbah keramik, perlu diketahui bahwa seluruh sampel benda uji yang digunakan masih memenuhi standar sesuai dengan ketentuan syarat dalam SNI 01-4449-2006 tentang Papan Serat dengan nilai penyerapan $< 30\%$ pada variasi konvensional dan inovasi, sehingga papan plafon penelitian dapat diklasifikasikan sebagai Papan Serat Kerapatan Tinggi (PSKT). Oleh karena itu, campuran yang menghasilkan keseimbangan penyerapan dan porositas paling optimal adalah pada V2 dengan substitusi 10% serbuk limbah keramik.

4.3.5. Rekapitulasi Hasil Pengujian

Setelah dilakukan serangkaian pengujian karakteristik fisik dan mekanis terhadap sampel benda uji plafon GRC dengan substitusi serbuk limbah keramik yang mengacu pada standar SNI 01-4449-2006 tentang Papan Serat. Data rekapitulasi hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 4.27** dibawah ini:

Tabel 4.27. Rekapitulasi Hasil Pengujian

No	Variasi	Kuat Lentur		Densitas	Daya Serap Air
		N/mm ²	kgf/cm ²	gr/cm ³	%
1.	V0	28,434	289,941	1,968	8,526
2.	V1	32,663	333,068	1,983	7,692
3.	V2	33,696	343,594	1,986	7,284
4.	V3	30,731	313,368	1,972	8,124
5.	V4	25,737	262,443	1,867	11,595
6.	V5	17,853	182,051	1,782	14,204

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.27** Substitusi serbuk limbah keramik memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap karakteristik fisik (densitas dan daya serap air) maupun mekanis (kuat lentur) dari inovasi plafon GRC. Secara keseluruhan, komposisi terbaik untuk pembuatan campuran inovasi plafon GRC

dengan substitusi serbuk limbah keramik dicapai pada V2 (10%). Pada titik ini, seluruh parameter berada pada kondisi optimal dimana kuat lentur dan densitas mencapai nilai maksimum, sementara kemampuan dalam penyerapan air berada pada persentase paling minimum atau paling kedap air.

Hasil penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian yang dilakukan oleh Sapulette et al. (2024) yang meneliti pengaruh serbuk limbah keramik sebagai substitusi parsial semen pada pembuatan dinding partisi *kalsiboard*. Penelitian tersebut menggunakan parameter pengujian yang sama, yaitu pengujian kuat lentur, kerapatan, dan daya serap air sesuai SNI 01-4449-2006 tentang Papan Serat, sehingga hasil dari kedua penelitian dapat dibandingkan.

Sapulette et al. (2024) menggunakan lima variasi campuran, yaitu 0% (kontrol), 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% sebagai substitusi parsial semen dengan serbuk limbah keramik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada pengujian kerapatan, variasi kontrol (0%) memiliki nilai sebesar 1,138 gr/cm³, nilai tertinggi diperoleh pada variasi 5% sebesar 1,147 gr/cm³, sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi 10% sebesar 1,134 gr/cm³. Pada pengujian kuat lentur, variasi kontrol menghasilkan nilai 70,102 kgf/cm², kemudian meningkat hingga mencapai nilai tertinggi pada variasi 7,5% sebesar 74,352 kgf/cm², dan menurun menjadi 67,977 kgf/cm² pada variasi 10%. Sementara itu, pada pengujian daya serap air, variasi kontrol memiliki nilai sebesar 22,41%, kemudian menurun hingga mencapai nilai terendah pada variasi 7,5% sebesar 22,59%, namun kembali meningkat menjadi 21,81% pada variasi 10%. Berdasarkan hasil ketiga pengujian tersebut, Sapulette et al. (2024) menetapkan variasi substitusi serbuk limbah keramik sebesar 7,5% sebagai komposisi optimum, karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara karakteristik fisik dan mekanis dinding partisi *kalsiboard*.

Hasil tersebut memiliki kecenderungan yang sama dengan penelitian ini, di mana penambahan serbuk limbah keramik mampu meningkatkan karakteristik fisik dan mekanis hingga mencapai kadar substitusi tertentu, kemudian mengalami penurunan ketika kadar substitusi terus ditingkatkan. Pada penelitian ini, variasi optimum diperoleh pada V2 (10%), yang menghasilkan kuat lentur tertinggi sebesar 33,696 N/mm² atau 343,594 kgf/cm², kerapatan tertinggi sebesar 1,986 gr/cm³, serta

daya serap air terendah sebesar 7,284%. Sebaliknya, peningkatan kadar substitusi hingga 15%, 20%, dan 25% menyebabkan kuat lentur dan kerapatan mengalami penurunan, sedangkan daya serap air meningkat. Pola perubahan tersebut menunjukkan kecenderungan yang sama dengan penelitian Sapulette et al. (2024), yaitu adanya kadar substitusi optimum yang mampu meningkatkan kualitas material, sedangkan penggunaan serbuk limbah keramik dalam jumlah yang lebih tinggi justru menurunkan karakteristik fisik dan mekanis papan berbasis semen.

Meskipun demikian, terdapat perbedaan kadar substitusi optimum antara kedua penelitian. Sapulette et al. (2024) memperoleh komposisi optimum pada substitusi 7,5%, sedangkan penelitian ini memperoleh komposisi optimum pada substitusi 10%. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh perbedaan jenis produk dan komposisi campuran yang digunakan. Penelitian Sapulette et al. menggunakan dinding partisi kalsiboard berbasis gypsum-semen, sedangkan penelitian ini menggunakan plafon GRC berbasis semen-pasir yang diperkuat serat kaca. Perbedaan karakteristik material penyusun tersebut memengaruhi proses hidrasi, pembentukan struktur mikro, serta interaksi antara matriks semen dan bahan penguat, sehingga menghasilkan kadar substitusi optimum yang berbeda meskipun kedua penelitian sama-sama menggunakan serbuk limbah keramik sebagai substitusi parsial semen.

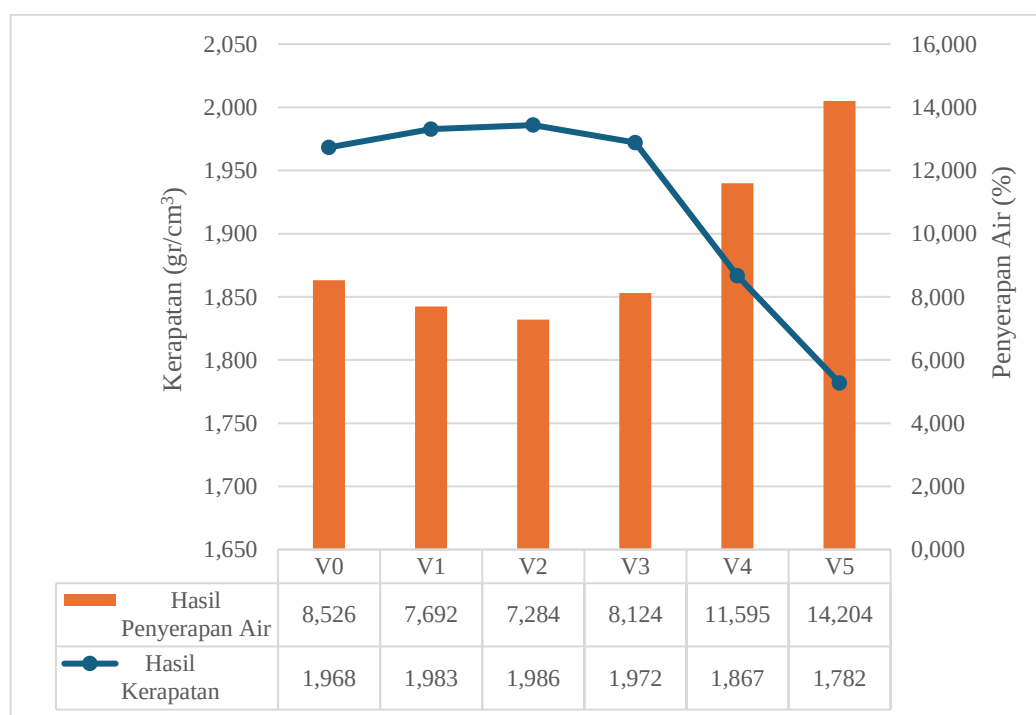
4.4. Hubungan Sifat Fisik Terhadap Sifat Mekanis Inovasi Plafon GRC

Analisis keterkaitan antara karakteristik fisik yang diwakili oleh nilai densitas dan penyerapan air terhadap kerja mekanis berupa kuat lentur pada plafon GRC (*Glassfiber Reinforced Concrete*). Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium menunjukkan hasil yang dimana kepadatan massa tidak selalu berbanding lurus dengan ketahanan lentur.

4.4.1. Analisis Kepadatan Struktur (Densitas) dan Penyerapan Air

Untuk lebih memahami perilaku material penyusun plafon GRC (*Glassfiber Reinforced Concrete*) dilakukan analisis hubungan antara sifat fisik yang saling berkaitan yaitu densitas dan penyerapan air. Material dengan kepadatan struktur

yang tinggi umumnya memiliki tingkat porositas yang lebih rendah, sehingga akan menghasilkan ketahanan yang lebih baik terhadap penyerapan air. Sebagai gambaran visual terkait pengaruh substitusi semen parsial dengan serbuk limbah keramik terhadap sifat fisik, **Grafik 4.17** berikut menyajikan hubungan antara kepadatan struktur (densitas) dengan penyerapan air pada pada plafon GRC.



Grafik 4.17. Hubungan Sifat Fisik Plafon GRC

Pada V0 dihasilkan nilai kerapatan $1,968 \text{ gr/cm}^3$ dengan persentase penyerapan air sebesar 8,526% sebagai dasar papan semen-pasir konvensional tanpa bahan substitusi. Selanjutnya, V1 mengalami peningkatan kerapatan menjadi $1,983 \text{ gr/cm}^3$ dan penyerapan air turun menjadi 7,692%. Hasil ini menunjukkan dengan adanya penambahan serbuk limbah keramik sebanyak 5% dapat bekerja secara efektif mengurangi celah / rongga antara butiran semen dan pasir. Substitusi parsial semen dengan serbuk limbah keramik berfungsi sebagai *micro-filler* yang membantu dalam memperkuat struktur matriks serta lebih kedap air karena berkurangnya ruang yang dilewati.

Pada V2, kepadatan mencapai batas maksimum dengan nilai $1,986 \text{ gr/cm}^3$ yang dimana matriks yang dihasilkan lebih padat dengan penyerapan air yang menurun menjadi 7,284%. Hal ini sejalan dengan maksud kepadatan yang lebih tinggi akan menghasilkan penyerapan yang lebih rendah (Sapulette et al., 2024).

Penurunan mulai terjadi pada V3 dengan penambahan 15% serbuk limbah keramik meskipun penurunannya masih tidak terlalu signifikan, persentase ini dapat menjadi ambang batas substitusi yang dapat bekerja secara optimal. Selain itu, pada V4 dan V5 mengalami penurunan yang mencolok mulai dari kepadatan yang turun menjadi $1,867 \text{ gr/cm}^3$ dan $1,782 \text{ gr/cm}^3$, kemudian penyerapan airnya menjadi 11,595% dan 14,204%. Hasil tersebut dapat terjadi akibat persentase substitusi serbuk limbah keramik yang terlalu banyak sehingga menghambat hidrasi semen secara sempurna.

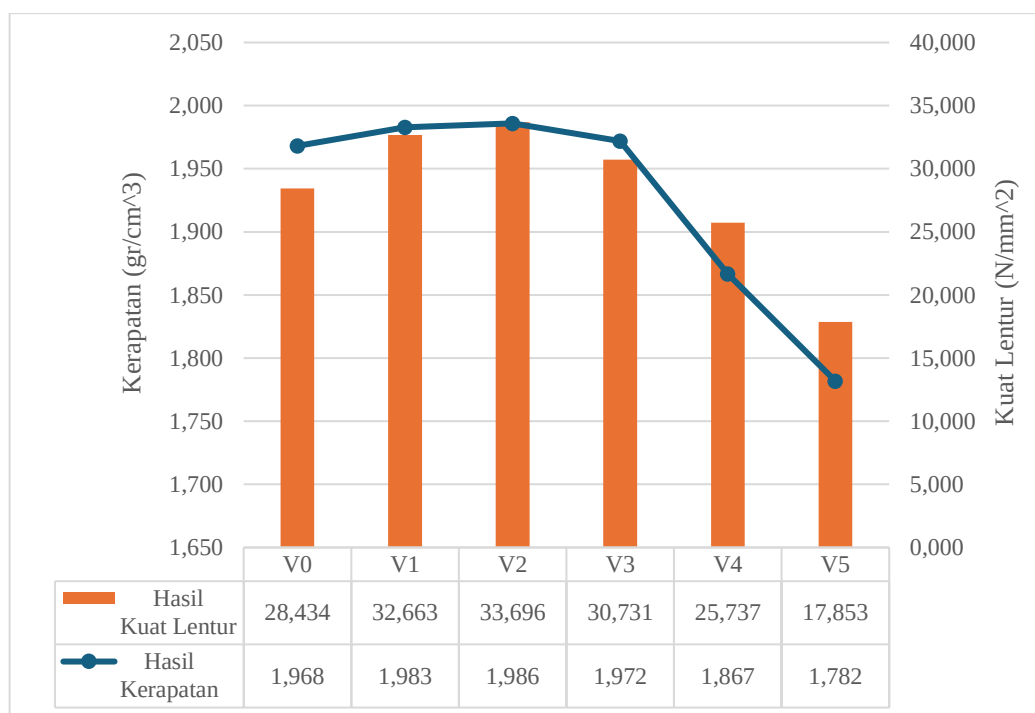
Chen & Guan (2025) mendukung penjelasan ini dengan mekanisme *loosening effect* dimana ketika partikel pengisi melebihi batas optimum akan mendorong partikel menjauh atau memberikan efek pelonggaran sehingga menciptakan lebih banyak ruang kosong hingga menurunkan kepadatan material. Penelitian oleh Sapulette et al. (2024) juga memperkuat hasil dengan kesimpulan bahwa serbuk limbah keramik tidak dapat sepenuhnya menggantikan fungsi semen sebagai bahan ikat apabila kadarnya terlalu tinggi, karena ikatan matriks justru akan menurun.

Secara keseluruhan, hasil paling optimal diperoleh pada V2 dengan substitusi 10% serbuk limbah keramik dengan capaian kepadatan tertinggi dan mampu menjaga ambang batas penyerapan tetap dibawah 30% sesuai dengan SNI 01-4449-2006 tentang Papan Serat. Komposisi ini menunjukkan V2 merupakan campuran yang menjanjikan secara struktural dan lingkungan untuk aplikasi plafon GRC.

4.4.2. Pengaruh Kepadatan Terhadap Capaian Hasil Kuat Lentur

Kepadatan struktur adalah salah satu indicator untuk menentukan beban yang mampu diterima oleh papan semen. Perlu diketahui bagaimana korelasi peningkatan densitas material akan diikuti peningkatan kuat lenturnya. Berdasarkan

Grafik 4.18 berikut menyajikan pengaruh kepadatan terhadap capaian hasil kuat lentur pada inovasi plafon GRC.



Grafik 4.18. Hubungan Densitas dan Kuat Lentur

Berdasarkan hasil pada **Grafik 4.18**, menunjukkan adanya hubungan positif antara densitas dengan capaian kuat lentur dari V0 hingga mencapai batas optimum pada V2 (substitusi 10%). Variabel kontrol yang memiliki nilai kerapatan $1,9687 \text{ gr/cm}^3$ dengan kuat lentur sebesar $28,434 \text{ N/mm}^2$ atau $289,941 \text{ kgf/cm}^2$. Seiring bertambahnya persentase serbuk limbah keramik, nilai kerapatan meningkat berturut-turut pada V1 (substitusi 5%) menjadi $1,983 \text{ gr/cm}^3$ dengan kuat lentur sebesar $32,663 \text{ N/mm}^2$ atau $333,068 \text{ kgf/cm}^2$ dan mencapai nilai puncaknya pada V2 (substitusi 10%) dengan densitas tertinggi $1,986 \text{ gr/cm}^3$ serta kuat lentur maksimum mencapai $33,696 \text{ N/mm}^2$ atau $343,594 \text{ kgf/cm}^2$.

Peningkatan yang berjalan dengan beriringan membuktikan adanya dampak positif dari pemanfaatan serbuk limbah keramik sebagai material pozzolanik. Kandungan senyawa *silika* (SiO_2) dan *alumina* (Al_2O_3) pada serbuk limbah keramik

berkontribusi dalam dua mekanisme utama, yaitu efek pengisi (*active filler*) dan reaksi pozzolanik sekunder (Murali et al., 2025).

Sebaliknya, penurunan pada densitas dan kuat lentur terjadi mulai pada V3 hingga V5 (kadar substitusi 15% - 25%) merupakan konsekuensi dari fenomena efek dilusi semen (*cement dilution effect*). Menurut Murali et al. (2025), penggantian semen yang melampaui ambang batas optimal menyebabkan berkurangnya jumlah bahan pengikat reaktif dalam campuran. Kondisi ini diperburuk oleh efek pelonggaran (*loosening effect*) yang dijelaskan oleh Chen & Guan (2025), dimana partikel pengisi yang berlebih justru mulai mendorong partikel menjauh dan menciptakan lebih banyak rongga udara.

Struktur yang tidak padat dan berpori ini menyebabkan distribusi tegangan menjadi tidak merata saat papan menerima beban lentur. Minimnya bahan pengikat juga memicu terjadinya kegagalan pelepasan ikatan (*debonding*) antara serat dan matriks, sehingga kehilangan kemampuan daktilitasnya. Sejalan dengan temuan penelitian terdahulu oleh Sapulette et al. (2024), rendahnya kepadatan pada variasi substitusi tertinggi mengakibatkan material mengalami keruntuhan getas (*brittle failure*) pada tingkat pembebanan yang jauh lebih rendah.

Dengan demikian, hasil data menegaskan bahwa densitas dapat bertindak sebagai indikator prediktif yang valid bagi sifat mekanis papan GRC. Seperti temuan Rahmadi et al. (2024), peningkatan massa jenis mengindikasikan terciptanya ikatan yang lebih kuat antara matriks semen dengan serat penguat, dimana rongga udara tertutupi secara efektif oleh partikel pengisi. Hal ini di dukung oleh hasil penelitian penulis yang mencatat bahwa variasi plafon dengan densitas lebih tinggi mampu menghasilkan kuat lentur yang lebih tinggi serta melampaui plafon konvensional.

4.4.3. Analisis Mekanisme Kegagalan Kuat Lentur

Berdasarkan hasil pengujian pada **Grafik 4.18** menunjukkan kegagalan mekanis terlihat pada V5 dengan substitusi tertinggi dan nilai kuat lentur yang dihasilkan sebesar 17,853 N/mm² atau setara dengan 182,051 kgf/cm², dimana nilai yang dihasilkan turun hingga di bawah ambang batas minimal sesuai standar SNI 01-

4449-2006 yang mensyaratkan hasil kuat lentur harus $\geq 20 \text{ N/mm}^2$ atau $\geq 204 \text{ kgf/cm}^2$.

Kegagalan ini disebabkan oleh ketidakseimbangan proporsi antara volume bahan pengikat (*binder*) dengan total luas permukaan partikel dalam campuran. Hal ini didukung oleh temuan Murali et al. (2025), substitusi semen yang melampaui ambang batas dapat memicu terjadinya fenomena efek dilusi semen. Dimana jumlah *trikalsium silikat* (C_3S) yang tersedia membentuk gel hidrasi utama (C-S-H) menjadi sangat terbatas, akibatnya kekuatan ikat internal matriks semen melemah dan mengurangi kemampuan dalam menahan beban lentur.

Secara *microstructure* material, penurunan performa pada kadar substitusi tertinggi dapat terjadi karena volume semen tidak lagi cukup untuk menyelimuti seluruh permukaan serat *fiberglass* dan agregat secara kontinu. Sejalan dengan analisis Chen & Guan (2025), pasta semen berperan krusial dalam mentransfer tegangan dari matriks ke serat penguat. Apabila volume pasta berkurang secara drastis akibat substitusi serbuk limbah keramik yang terlalu banyak, maka distribusi tegangan juga menjadi tidak merata. Kondisi ini akan menciptakan titik lemah (*weak spots*) dan penambahan rongga makro dalam struktur papan, ketika papan menerima beban lentur retakan akan merambat dengan cepat tanpa penahanan yang memadai dari matriks struktur.

Temuan ini diperkuat oleh penelitian Taher et al. (2023), partikel limbah yang berlebihan tidak lagi berfungsi sebagai *micro-filler* yang memadatkan struktur, melainkan bertindak sebagai pengisi yang menghalangi pengikatan mekanis (*bonding*) antara semen dan serat. Tanpa adanya ikatan yang kuat, serat tidak dapat bekerja secara optimal dalam menahan beban lentur pada papan dan gagal mencapai standar spesifikasi yang ditetapkan oleh SNI.

4.5. Analisis Rancangan Anggaran Biaya (RAB) Inovasi Plafon GRC

Pada penelitian ini dilakukan analisis Rancangan Anggaran Biaya (RAB) untuk membandingkan biaya produksi plafon GRC (*Glassfiber Reinforced Cement*) konvensional dengan plafon GRC inovasi yang menggunakan variasi substitusi serbuk keramik. Analisis biaya dilakukan dengan menghitung kebutuhan setiap

material penyusun pada masing-masing variasi campuran serta harga satuan bahan yang digunakan. Melalui perbandingan biaya produksi tersebut, dapat diketahui pengaruh penggunaan serbuk keramik terhadap biaya pembuatan plafon GRC dan tingkat efisiensi yang dihasilkan dibandingkan dengan plafon GRC konvensional. Adapun rincian perhitungan biaya produksi untuk setiap variasi pada penelitian ini disajikan pada **Tabel 4.28** harga material pembuatan plafon sebagai berikut.

Tabel 4.28. Harga Material Pembuatan Plafon

Satuan	Harga Semen/kg Rp	Harga Pasir/kg Rp	Harga <i>Fiberglass</i> /kg Rp	Harga Limbah Keramik Rp
kg	1.200,00	1.250,00	43.000,00	0,00
gr	1,20	1,25	43,00	0,00

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

4.5.1. Plafon Konvensional (V0)

Pada V0 ini perbandingan limbah keramik yang digunakan sebagai substitusi semen sebanyak 0%. Berikut adalah rincian harga produksinya.

- a) Kebutuhan semen = 49,14 gr
 Harga semen = Kebutuhan semen x harga bahan
 = 49,14 x Rp 1,20
 = **Rp 58,97**
- b) Kebutuhan pasir = 64,73 gr
 Harga pasir = Kebutuhan pasir x harga bahan
 = 64,73 x Rp 1,25
 = **Rp 80,91**

- c) Kebutuhan *fiberglass* = 1,44 gr
 Harga *fiberglass* = Kebutuhan *fiberglass* x harga bahan
 = 1,44 x Rp 43,00
 = **Rp 61,92**
- d) Kebutuhan serbuk keramik = 0 gr
 Harga serbuk keramik = Kebutuhan serbuk keramik x harga bahan
 = 0 x Rp 0,00
 = **Rp 0,00**

Tabel 4.29. Rincian Harga Pembuatan Plafon Variasi V0

No.	Bahan	Qty (gr)	Harga Satuan (Rp)	Jumlah (Rp)
1	Semen	49,14	1,20	58,97
2	Pasir	64,73	1,25	80,91
3	<i>Fiberglass</i>	1,44	43,00	61,92
4	Serbuk Keramik	0,00	0,00	0,00
Total Biaya Produksi				201,80

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.29** diperoleh nilai biaya produksi pembuatan benda uji variasi V0 sebesar **Rp 201,80**. Variasi V0 merupakan plafon konvensional tanpa penggunaan serbuk keramik sebagai substitusi semen (0%), sehingga seluruh kebutuhan bahan pengikat masih menggunakan semen. Dari total biaya produksi tersebut, komponen biaya terbesar berasal dari penggunaan pasir dan *fiberglass*, sedangkan tidak terdapat biaya untuk serbuk keramik karena tidak digunakan pada variasi ini.

4.5.2. Plafon Inovasi Substitusi 5% (V1)

Pada V1 ini perbandingan limbah keramik yang digunakan sebagai substitusi semen sebanyak 5%. Berikut adalah rincian harga produksinya.

- a) Kebutuhan semen = 46,68 gr
 Harga semen = Kebutuhan semen x harga bahan
 = 46,68 x Rp 1,20
 = **Rp 56,02**
- b) Kebutuhan pasir = 64,73 gr
 Harga pasir = Kebutuhan pasir x harga bahan
 = 64,73 x Rp 1,25
 = **Rp 80,91**
- c) Kebutuhan *fiberglass* = 1,44 gr
 Harga *fiberglass* = Kebutuhan fiberglass x harga bahan
 = 1,44 x Rp 43,00
 = **Rp 61,92**
- d) Kebutuhan serbuk keramik = 2,15 gr
 Harga serbuk keramik = Kebutuhan serbuk keramik x harga bahan
 = 2,15 x Rp 0,00
 = **Rp 0,00**

Tabel 4.30. Rincian Harga Pembuatan Plafon Variasi V1

No.	Bahan	Qty (gr)	Harga Satuan (Rp)	Jumlah (Rp)
1	Semen	46,68	1,20	56,02
2	Pasir	64,73	1,25	80,91
3	<i>Fiberglass</i>	1,44	43,00	61,92
4	Serbuk Keramik	2,15	0,00	0,00
Total Biaya Produksi				198,85

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.30** diperoleh nilai biaya produksi pembuatan benda uji variasi V1 sebesar **Rp 198,85**. Variasi V1 menggunakan serbuk keramik sebagai

substitusi semen sebesar 5%, sehingga kebutuhan semen berkurang dibandingkan variasi V0. Pengurangan penggunaan semen menyebabkan total biaya produksi menurun sebesar Rp2,95 atau sekitar 1,46% dibandingkan variasi V0 yang memiliki biaya produksi sebesar Rp201,80. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan serbuk keramik sebagai material substitusi semen dapat memberikan penghematan biaya produksi meskipun dalam jumlah yang relatif kecil.

4.5.3. Plafon Inovasi Substitusi 10% (V2)

Pada V2 ini perbandingan limbah keramik yang digunakan sebagai substitusi semen sebanyak 10%. Berikut adalah rincian harga produksinya.

- | | |
|--------------------------------|--|
| a) Kebutuhan semen | = 44,23 gr |
| Harga semen | = Kebutuhan semen x harga bahan |
| | = 44,23 x Rp 1,20 |
| | = Rp 53,08 |
| b) Kebutuhan pasir | = 64,73 gr |
| Harga pasir | = Kebutuhan pasir x harga bahan |
| | = 64,73 x Rp 1,25 |
| | = Rp 80,91 |
| c) Kebutuhan <i>fiberglass</i> | = 1,44 gr |
| Harga <i>fiberglass</i> | = Kebutuhan fiberglass x harga bahan |
| | = 1,44 x Rp 43,00 |
| | = Rp 61,92 |
| d) Kebutuhan serbuk keramik | = 4,29 gr |
| Harga serbuk keramik | = Kebutuhan serbuk keramik x harga bahan |
| | = 4,29 x Rp 0,00 |
| | = Rp 0,00 |

Tabel 4.31. Rincian Harga Pembuatan Plafon Variasi V2

No.	Bahan	Qty (gr)	Harga Satuan (Rp)	Jumlah (Rp)
1	Semen	44,23	1,20	53,08
2	Pasir	64,73	1,25	80,91
3	<i>Fiberglass</i>	1,44	43,00	61,92
4	Serbuk Keramik	4,29	0,00	0,00
Total Biaya Produksi				195,91

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.31** diperoleh nilai biaya produksi pembuatan benda uji variasi V2 sebesar **Rp 195,91**. Variasi V2 menggunakan serbuk keramik sebagai substitusi semen sebesar 10%, sehingga kebutuhan semen berkurang menjadi 44,23 gr. Pengurangan penggunaan semen menyebabkan biaya produksi lebih rendah dibandingkan variasi V0 dan V1. Jika dibandingkan dengan variasi V0, biaya produksi V2 mengalami penurunan sebesar Rp5,89 atau sekitar 2,92%, yang menunjukkan bahwa peningkatan persentase substitusi serbuk keramik mampu meningkatkan efisiensi biaya produksi plafon GRC.

4.5.4. Plafon Inovasi Substitusi 15% (V3)

Pada V3 ini perbandingan limbah keramik yang digunakan sebagai substitusi semen sebanyak 15%. Berikut adalah rincian harga produksinya.

- a) Kebutuhan semen = 41,77 gr
 Harga semen = Kebutuhan semen x harga bahan
 = 41,77 x Rp 1,20
 = **Rp 50,12**
- b) Kebutuhan pasir = 64,73 gr
 Harga pasir = Kebutuhan pasir x harga bahan
 = 64,73 x Rp 1,25
 = **Rp 80,91**

- c) Kebutuhan *fiberglass* = 1,44 gr
 Harga *fiberglass* = Kebutuhan *fiberglass* x harga bahan
 = 1,44 x Rp 43,00
 = **Rp 61,92**
- d) Kebutuhan serbuk keramik = 6,44 gr
 Harga serbuk keramik = Kebutuhan serbuk keramik x harga bahan
 = 4,29 x Rp 0,00
 = **Rp 0,00**

Tabel 4.32. Rincian Harga Pembuatan Plafon Variasi V3

No.	Bahan	Qty (gr)	Harga Satuan (Rp)	Jumlah (Rp)
1	Semen	41,77	1,20	50,12
2	Pasir	64,73	1,25	80,91
3	<i>Fiberglass</i>	1,44	43,00	61,92
4	Serbuk Keramik	6,44	0,00	0,00
Total Biaya Produksi				192,95

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.32** diperoleh nilai biaya produksi pembuatan benda uji variasi V3 sebesar **Rp 192,95**. Variasi V3 menggunakan serbuk keramik sebagai substitusi semen sebesar 15%, sehingga kebutuhan semen semakin berkurang dibandingkan variasi sebelumnya. Penurunan penggunaan semen menyebabkan total biaya produksi juga mengalami penurunan. Jika dibandingkan dengan variasi V0, biaya produksi V3 lebih rendah sebesar **Rp8,85** atau sekitar **4,39%**. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase substitusi serbuk keramik memberikan penghematan biaya yang semakin besar, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi ekonomi dalam pembuatan plafon GRC.

4.5.5. Plafon Inovasi Substitusi 20% (V4)

Pada V4 ini perbandingan limbah keramik yang digunakan sebagai substitusi semen sebanyak 20%. Berikut adalah rincian harga produksinya.

- a) Kebutuhan semen = 39,31 gr
 Harga semen = Kebutuhan semen x harga bahan
 = 39,31 x Rp 1,20
 = **Rp 47,17**
- b) Kebutuhan pasir = 64,73 gr
 Harga pasir = Kebutuhan pasir x harga bahan
 = 64,73 x Rp 1,25
 = **Rp 80,91**
- c) Kebutuhan *fiberglass* = 1,44 gr
 Harga *fiberglass* = Kebutuhan fiberglass x harga bahan
 = 1,44 x Rp 43,00
 = **Rp 61,92**
- d) Kebutuhan serbuk keramik = 8,58 gr
 Harga serbuk keramik = Kebutuhan serbuk keramik x harga bahan
 = 8,58 x Rp 0,00
 = **Rp 0,00**

Tabel 4.33. Rincian Harga Pembuatan Plafon Variasi V4

No.	Bahan	Qty (gr)	Harga Satuan (Rp)	Jumlah (Rp)
1	Semen	39,31	1,20	47,17
2	Pasir	64,73	1,25	80,91
3	<i>Fiberglass</i>	1,44	43,00	61,92
4	Serbuk Keramik	8,58	0,00	0,00
Total Biaya Produksi				190,00

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan **Tabel 4. 33** diperoleh nilai biaya produksi pembuatan benda uji variasi V4 sebesar **Rp 190,00**. Variasi V4 menggunakan serbuk keramik sebagai substitusi semen sebesar 20%, sehingga kebutuhan semen berkurang menjadi 39,31 gr. Berkurangnya penggunaan semen menyebabkan biaya produksi semakin menurun dibandingkan variasi sebelumnya. Jika dibandingkan dengan variasi V0, biaya produksi V4 mengalami penurunan sebesar Rp11,80 atau sekitar 5,85%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan persentase substitusi serbuk keramik mampu memberikan penghematan biaya produksi yang lebih besar tanpa menambah biaya material karena serbuk keramik merupakan limbah yang diperoleh tanpa biaya pembelian.

4.5.6. Plafon Inovasi Substitusi 25% (V5)

Pada V4 ini perbandingan limbah keramik yang digunakan sebagai substitusi semen sebanyak 20%. Berikut adalah rincian harga produksinya.

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| a) Kebutuhan semen | = 36,85 gr |
| Harga semen | = Kebutuhan semen x harga bahan |
| | = 36,85 x Rp 1,20 |
| | = Rp 44,22 |
| b) Kebutuhan pasir | = 64,73 gr |
| Harga pasir | = Kebutuhan pasir x harga bahan |
| | = 64,73 x Rp 1,25 |
| | = Rp 80,91 |
| c) Kebutuhan <i>fiberglass</i> | = 1,44 gr |
| Harga <i>fiberglass</i> | = Kebutuhan fiberglass x harga bahan |
| | = 1,44 x Rp 43,00 |
| | = Rp 61,92 |

- d) Kebutuhan serbuk keramik = 10,73 gr
 Harga serbuk keramik = Kebutuhan serbuk keramik x harga bahan
 = 10,73 x Rp 0,00
 = **Rp 0,00**

Tabel 4.34. Rincian Harga Pembuatan Plafon Variasi V5

No.	Bahan	Qty (gr)	Harga Satuan (Rp)	Jumlah (Rp)
1	Semen	36,85	1,20	44,22
2	Pasir	64,73	1,25	80,91
3	Fiberglass	1,44	43,00	61,92
4	Serbuk Keramik	10,73	0,00	0,00
Total Biaya Produksi				187,05

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

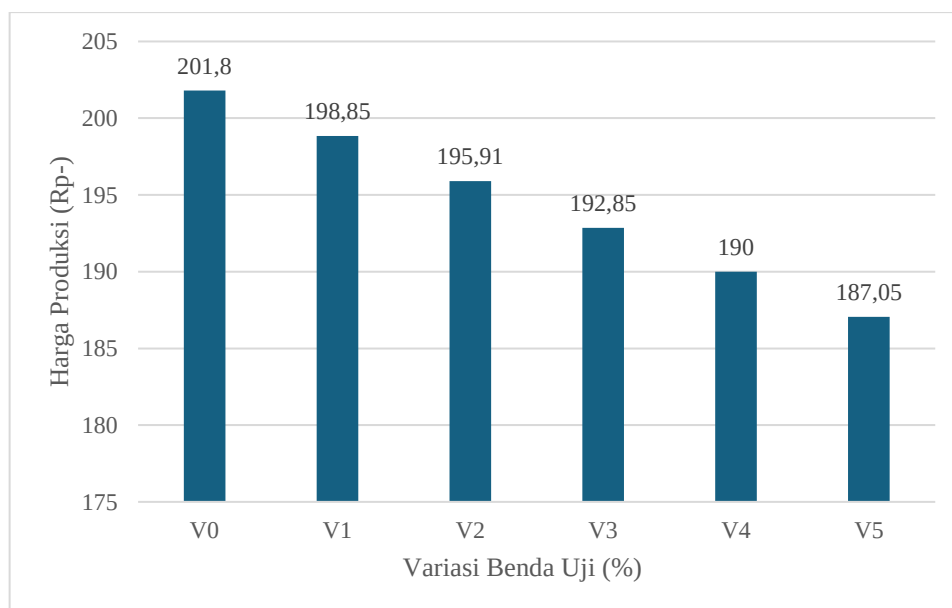
Berdasarkan **Tabel 4.34** diperoleh nilai biaya produksi pembuatan benda uji variasi V5 sebesar **Rp 187,05**. Variasi V5 menggunakan serbuk keramik sebagai substitusi semen sebesar 25%, sehingga kebutuhan semen menjadi yang paling rendah dibandingkan variasi lainnya, yaitu sebesar 36,85 gr. Penurunan penggunaan semen secara langsung menyebabkan biaya produksi semakin berkurang. Jika dibandingkan dengan variasi V0 yang memiliki biaya produksi sebesar Rp201,80, maka biaya produksi V5 mengalami penurunan sebesar Rp14,75 atau sekitar 7,31%. Dengan demikian, variasi V5 merupakan variasi dengan biaya produksi paling ekonomis pada penelitian ini karena mampu menghasilkan penghematan biaya terbesar melalui pemanfaatan limbah keramik sebagai material substitusi semen.

4.5.7. Rekapitulasi Biaya Produksi

Tabel 4.35. Rekapitulasi Biaya Produksi Benda Uji

Kode Sampel	Serbuk Keramik (%)	Biaya Produksi (Rp)	Selisih Terhadap V0 (Rp)	Penghematan (%)
V0	0	201,80	0,00	0,00
V1	5	198,85	2,95	1,46
V2	10	195,91	5,89	2,92
V3	15	192,95	8,85	4,39
V4	20	190,00	11,80	5,85
V5	25	187,05	14,75	7,31

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026



Grafik 4.19. Biaya Produksi

Berdasarkan **Tabel 4.35** dan **Grafik 4.19** dapat diketahui bahwa biaya produksi plafon GRC mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya persentase substitusi semen menggunakan serbuk limbah keramik. Variasi V0 yang tidak menggunakan serbuk keramik memiliki biaya produksi tertinggi sebesar Rp201,80. Sementara itu, variasi V5 dengan substitusi serbuk limbah keramik sebesar 25% memiliki biaya produksi terendah yaitu sebesar Rp187,05. Namun

demikian karena hasil uji sifat mekanis pada V5 tidak memenuhi standar batas minimal sesuai SNI 01-4449-2006 dimana hasil uji lentur minimal 20 N/mm^2 , maka variasi dengan biaya produksi terendah adalah pada V4 dengan substitusi serbuk limbah keramik sebesar 20% dengan biaya produksi Rp190,00 dan penghematan 5,85% dari V0.

Penurunan biaya produksi terjadi karena sebagian kebutuhan semen digantikan oleh serbuk limbah keramik yang dalam penelitian ini dianggap tidak memiliki biaya pembelian. Semakin besar persentase substitusi yang digunakan, semakin sedikit kebutuhan semen sehingga biaya produksi menjadi lebih rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah keramik sebagai material substitusi semen dapat memberikan keuntungan dari segi ekonomis. Jika dibandingkan antara variasi plafon konvensional V0 dengan variasi plafon inovasi V1, V2, V3, V4, dan V5 masing-masing mampu mengurangi biaya produksi sebesar Rp2,95; Rp5,89; Rp8,85; Rp11,80; dan Rp14,75. Persentase penghematan biaya yang diperoleh juga meningkat secara bertahap, yaitu dari 1,46% pada V1 hingga mencapai 7,31% pada V5.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan serbuk limbah keramik sebagai substitusi sebagian semen tidak hanya berpotensi mengurangi penggunaan material, tetapi juga mampu meningkatkan efisiensi biaya produksi plafon GRC. Namun, penentuan variasi optimum tidak hanya didasarkan pada biaya produksi, melainkan juga perlu mempertimbangkan dari hasil pengujian sifat fisik dan mekaniknya, seperti kerapatan, penyerapan air dan kuat lentur. Sehingga dapat diperoleh variasi yang memenuhi persyaratan teknis berdasarkan SNI yang berlaku sekaligus yang paling ekonomis produksinya.

4.5.8. Simulasi Biaya Produksi Plafon GRC ukuran 122 x 244 x 0,4 cm

Untuk memberikan gambaran mengenai potensi penerapan hasil penelitian pada produk skala besar seperti pembuatan plafon pabrik, dilakukan simulasi biaya produksi plafon GRC ukuran 122 x 244 x 0,4 cm. Simulasi ini menggunakan *job mix design* yang sama dengan benda uji, sehingga komposisi campuran pada setiap variasi tetap dipertahankan sesuai dengan rancangan campuran penelitian. Dengan

demikian, kebutuhan material yang digunakan pada satu lembar plafon dapat diestimasi berdasarkan komposisi campuran masing-masing variasi yang digunakan dalam penelitian.

Harga satuan material yang digunakan dalam simulasi ini sama dengan harga satuan yang digunakan pada perhitungan biaya produksi benda uji skala laboratorium, yaitu semen sebesar Rp1.200,00/kg, pasir sebesar Rp1.250,00/kg, fiberglass sebesar Rp43.000,00/kg, dan serbuk limbah keramik sebesar Rp0,00/kg. Berdasarkan komposisi campuran tersebut, diperoleh kebutuhan material untuk satu lembar plafon GRC ukuran $122 \times 244 \times 0,4$ cm yang disajikan pada **Tabel 4.36** terkait kebutuhan material pada pembuatan plafon GRC ($122 \times 244 \times 0,4$ cm) berikut:

Tabel 4.36. Kebutuhan Material Plafon GRC ($122 \times 244 \times 0,4$ cm)

Variasi	Semen (kg)	Pasir (kg)	Fiberglass (kg)	Serbuk Keramik (kg)
V0	14,63	19,27	0,43	0,00
V1	13,90	19,27	0,43	0,64
V2	13,17	19,27	0,43	1,28
V3	12,43	19,27	0,43	1,92
V4	11,70	19,27	0,43	2,55
V5	10,97	19,27	0,43	3,19

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan kebutuhan material tersebut, selanjutnya dilakukan perhitungan biaya produksi untuk setiap variasi dengan mengalikan kebutuhan masing-masing material terhadap harga satuan yang telah ditetapkan. Hasil estimasi biaya produksi plafon GRC ukuran $122 \times 244 \times 0,4$ cm disajikan pada **Tabel 4.37** terkait estimasi biaya produksi plafon GRC ($122 \times 244 \times 0,4$ cm) berikut:

Tabel 4.37. Estimasi Biaya Produksi Plafon GRC (122 x 244 x 0,4 cm)

Variasi	Biaya Semen	Biaya Pasir	Biaya Fiberglass	Biaya Serbuk Keramik	Total Biaya
	Rp	Rp	Rp	Rp	Rp
V0	17.555,57	24.084,68	18.434,66	0,00	60.074,91
V1	16.676,84	24.084,68	18.434,66	0,00	59.196,18
V2	15.801,68	24.084,68	18.434,66	0,00	58.321,02
V3	14.919,38	24.084,68	18.434,66	0,00	57.438,72
V4	14.040,65	24.084,68	18.434,66	0,00	56.559,99
V5	13.161,92	24.084,68	18.434,66	0,00	55.681,26

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.37**, diketahui bahwa penggunaan serbuk limbah keramik sebagai substitusi sebagian semen mampu menurunkan estimasi biaya produksi plafon GRC ukuran $122 \times 244 \times 0,4$ cm. Variasi V0 sebagai plafon GRC konvensional memiliki estimasi biaya produksi tertinggi sebesar Rp60.074,91 per lembar, sedangkan variasi V5 dengan substitusi serbuk limbah keramik sebesar 25% memiliki estimasi biaya produksi terendah sebesar Rp55.681,26 per lembar. Namun meskipun memiliki biaya produksi paling rendah, substitusi dengan 25% serbuk limbah keramik tidak dapat dikatakan paling optimal dari segi ekonomis karena pada V5 terdapat parameter yang tidak memenuhi syarat yaitu pada uji kuat lentur. Dimana pada V5 hasil uji lentur yang dihasilkan tidak memenuhi batas minimal sesuai SNI 01-4449-2006. Maka variasi dengan biaya produksi terendah adalah pada V4 dengan substitusi serbuk limbah keramik sebesar 20% dengan biaya produksi Rp56.559,99 per lembar.

Adanya penurunan biaya produksi terjadi secara bertahap seiring dengan meningkatnya persentase substitusi serbuk limbah keramik. Hal tersebut disebabkan oleh berkurangnya penggunaan semen sebagai bahan pengikat utama yang memiliki biaya lebih tinggi, sementara serbuk limbah keramik dimanfaatkan sebagai material substitusi yang pada penelitian ini diperoleh dari limbah sehingga tidak memerlukan biaya pembelian. Akibatnya, semakin besar persentase substitusi serbuk limbah keramik, semakin kecil biaya produksi yang dibutuhkan.

Jika dibandingkan dengan plafon GRC konvensional (V0), estimasi biaya produksi variasi V1, V2, V3, V4, dan V5 masing-masing mengalami penurunan sebesar Rp878,73, Rp1.753,89, Rp2.636,19, Rp3.514,92, dan Rp4.393,65. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan serbuk limbah keramik sebagai substitusi sebagian semen tidak hanya berpotensi mengurangi penggunaan semen, tetapi juga mampu meningkatkan efisiensi biaya produksi plafon GRC pada skala komersial.

4.6. Rekapitulasi Hasil Pengujian dan Perbandingan Harga

Adapun seluruh hasil data rekapitulasi uji fisik, mekanis hingga perbandingan biaya produksi plafon GRC ditunjukkan pada **Tabel 4.38** rekapitulasi hasil seluruh variasi sampel dibawah ini:

Tabel 4.38. Rekapitulasi Hasil Seluruh Sampel Uji

No	Variasi	Kuat Lentur		Densitas	Daya Serap Air	Harga
		N/mm ²	kgf/cm ²		%	Rp
1.	V0	28,434	289,941	1,968	8,526	201,80
2.	V1	32,663	333,068	1,983	7,692	198,85
3.	V2	33,696	343,594	1,986	7,284	195,91
4.	V3	30,731	313,368	1,972	8,124	192,95
5.	V4	25,737	262,443	1,867	11,595	190,00
6.	V5	17,853	182,051	1,782	14,204	187,05

Sumber: Hasil Perhitungan, 2026

Berdasarkan **Tabel 4.38** substitusi serbuk limbah keramik memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap karakteristik fisik (densitas dan daya serap air) maupun mekanis (kuat lentur) dari inovasi plafon GRC. Secara keseluruhan, komposisi terbaik untuk pembuatan campuran inovasi plafon GRC dengan substitusi serbuk limbah keramik dicapai pada V2 (10%). Pada titik ini, seluruh parameter teknis berada pada kondisi paling optimal, di mana nilai kuat lentur mencapai puncaknya sebesar 33,696 N/mm² (343,594 kgf/cm²) dan densitas maksimum sebesar 1,986 gr/cm³. Peningkatan kerapatan struktur pada V2 ini

berbanding lurus dengan kemampuan penyerapan air yang berada pada persentase paling minimum, yaitu sebesar 7,284%, yang mengindikasikan tingkat kedap air dan durabilitas material yang paling baik.

Meskipun dari segi biaya produksi nilai terendah berada pada variasi V5 (25%) dengan harga Rp187,05, penurunan performa fisik dan mekanis yang sangat drastis pada variasi V3 hingga V5 membuat variasi tersebut tidak efektif secara teknis. Sebaliknya, variasi V2 (10%) menunjukkan efisiensi biaya yang tetap lebih rendah dengan Rp195,91, dimana biaya ini lebih rendah jika dibandingkan dengan sampel kontrol V0 yang memiliki biaya Rp201,80 tanpa harus mengorbankan mutu material yang dihasilkan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi V2 substitusi serbuk limbah keramik sebanyak 10% merupakan komposisi yang paling optimal karena mampu menghasilkan plafon GRC dengan mutu fisik dan mekanis tertinggi sekaligus efisiensi biaya produksi yang tetap proporsional.