

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan hasil penelitian terkait pembuatan genteng beton ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah serbuk kaca dan abu tempurung kelapa sebagai bahan substitusi pada campuran. Hasil pengujian dari setiap variasi campuran disajikan serta dianalisis guna mengetahui pengaruh penambahan bahan tersebut terhadap mutu genteng beton yang dihasilkan.

Penilaian dilakukan terhadap karakteristik fisik dan mekanis genteng beton melalui beberapa pengujian, antara lain dimensi, kerataan permukaan, beban lentur, rembesan air, dan daya serap air. Selanjutnya, hasil pengujian dibahas untuk mengetahui karakteristik material dan tingkat kesesuaian mutu genteng beton berdasarkan standar yang berlaku.

4.1. Analisis Pengujian Material

Pengujian material merupakan tahapan awal yang sangat penting dalam penelitian ini untuk memastikan bahwa seluruh bahan penyusun genteng beton memenuhi persyaratan teknis dan memiliki karakteristik yang sesuai dengan standar yang berlaku. Pengujian dilakukan terhadap setiap material, baik bahan utama maupun bahan substitusi. Material yang diuji meliputi semen, agregat halus, limbah serbuk kaca, dan abu tempurung kelapa, dengan parameter pengujian yang disesuaikan berdasarkan karakteristik masing-masing bahan.

Hasil pengujian material ini menjadi dasar dalam perencanaan komposisi campuran serta evaluasi pengaruh penggunaan limbah serbuk kaca dan abu tempurung kelapa terhadap mutu genteng beton yang dihasilkan.

4.1.1 Pasir

Pengujian material pasir dilakukan untuk mengetahui karakteristik agregat halus yang digunakan dalam pembuatan genteng beton. Pasir sebagai salah satu bahan

utama campuran beton memiliki pengaruh yang besar terhadap kualitas, kekuatan, dan kepadatan genteng yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan pengujian terhadap sifat fisik pasir. Hasil pengujian ini digunakan sebagai acuan dalam menentukan kualitas material serta perencanaan campuran yang sesuai agar diperoleh genteng beton dengan mutu yang baik.

a. Kadar Lumpur

Bertujuan untuk mengetahui besarnya kandungan lumpur yang terdapat dalam agregat halus. Hasil pengujian kadar lumpur pasir dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Hasil Uji Kadar Lumpur

Tinggi Lumpur	Tinggi Pasir
5 ml	200 ml

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan data hasil pemeriksaan yang telah diperoleh, selanjutnya dilakukan analisis serta perhitungan untuk mendapatkan hasil pengujian yang diperlukan sebagai berikut:

$$Kadar\ Lumpur = \frac{(A - B)}{A} \times 100\%$$

Dengan:

A : Tinggi Lumpur (ml)

B : Tinggi Pasir (ml)

Hasil:

$$\begin{aligned} Kadar\ Lumpur &= \frac{205-200}{205} \times 100\% \\ &= \frac{5}{205} \times 100\% \\ &= 2,4\% \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh kadar lumpur pada pasir sebesar 2,4%. Nilai tersebut masih memenuhi ketentuan dalam SK-SNI-S-04-1989-F, yaitu kadar lumpur agregat halus tidak boleh melebihi 5%. Dengan demikian, pasir yang digunakan dalam penelitian ini dinyatakan layak digunakan sebagai bahan campuran pembuatan genteng beton.

b. Gradasi Pasir

Modulus kehalusan merupakan indeks yang menunjukkan tingkat kehalusan atau kekasaran pasir berdasarkan hasil analisis saringan. Nilai modulus kehalusan sangat berpengaruh terhadap kebutuhan air, *workability*, serta kepadatan campuran. Hasil evaluasi terhadap gradasi butiran pasir yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4.2 Hasil Gradasi Butiran Pasir

Saringan		Berat Tertahan	Persentase Berat Tertahan	Persentase Berat Tertahan Kumulatif	Persentase Lolos Kumulatif
Ukuran (mm)	No. Saringan	Gram (a)	% (b) = (a) / W	% (c)	% (d) = 100 - (c)
9.5	3/8	0	0	0	100
4.75	4	2,70	0,27	0,27	99,73
2.36	8	80,30	8,03	8,30	91,70
1.18	16	184,70	18,47	26,77	73,23
0.60	30	269,50	26,95	53,72	46,28
0.30	50	172,70	17,27	70,99	29,01
0.15	100	213,90	21,39	92,38	7,62
Pan		75,10	7,51	99,89	0
Total (W)		998,90	99,89	352,32	

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian gradasi yang telah dilakukan, diperoleh data yang kemudian dianalisis dan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$MHB = \frac{\Sigma \text{ Berat Tertinggal Kumulatif}}{100}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned}
 \text{Berat tertinggal (\%)} &= \frac{\text{Berat tertinggal}}{\text{Berat total}} \times 100\% \\
 &= \frac{2,70}{998,9} \times 100\% \\
 &= 0,27\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat tertinggal kumulatif} &= \text{Persentase berat tertinggal} + \text{persentase} \\
 &\quad \text{berat tertinggal sebelumnya} \\
 &= 0,27\% + 0\% \\
 &= 0,27\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Lolos kumulatif (\%)} &= 100\% - \text{Persentase berat tertinggal} \\
 &= 100\% - 0,27\% \\
 &= 99,73\% \\
 \text{Modulus halus butir} &= \frac{\Sigma \text{berat tertinggal kumulatif}}{100} \\
 &= \frac{352,320}{100} \times 100\% \\
 &= 3,52\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian gradasi pasir, diperoleh nilai modulus butir halus sebesar 3,52%. Mengacu pada ketentuan SNI 03-1972-1990, nilai modulus butir halus agregat halus yang diperbolehkan berada pada rentang 1,5%–3,8%. Oleh karena itu, hasil pengujian yang diperoleh masih termasuk dalam batas standar yang ditetapkan, sehingga pasir yang digunakan dinyatakan memenuhi persyaratan gradasi agregat halus.

c. Berat Jenis Pasir

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh nilai *specific gravity* agregat halus yang digunakan sebagai parameter dalam perencanaan campuran (*mix design*) genteng beton. Nilai berat jenis pasir berperan penting dalam menentukan perbandingan material berdasarkan metode volume absolut sehingga komposisi campuran yang direncanakan dapat lebih akurat. Oleh karena itu, data hasil pengujian berat jenis pasir menjadi dasar penting dalam penyusunan *mix design* agar diperoleh campuran genteng beton dengan *workability*, kepadatan, dan mutu yang sesuai dengan perencanaan. Hasil pengujian berat jenis yang digunakan sebagai acuan dalam perhitungan proporsi campuran ditampilkan pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Berat Jenis Pasir

No.	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1	Berat Piknometer Kosong (W_a)	gr	210
2	Berat Piknometer + Aquades (W_b)	gr	708,4
3	Suhu Piknometer + Aquades (t)	°C	29
4	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades (T_1)	°C	0,965
5	Harga Air Piknometer (W_t) = ($W_b - W_a$) x (T_1)	gr	480,956
6	Berat Piknometer + Pasir (W_c)	gr	410
7	Berat Piknometer + Pasir + Aquades (W_d)	gr	832,1
8	Suhu Piknometer + Aquades + Pasir (t)	°C	30
9	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades + Pasir (T_2)	°C	0,958
10	Berat Jenis	gr/cm ³	2,611

$$G_s = \frac{W_c - W_a}{W_t - (W_d - W_c) \times T_2}$$

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis agregat halus, diperoleh nilai berat jenis pasir sebesar 2,611 gr/cm³. Nilai tersebut telah memenuhi ketentuan dalam SNI 1970:2008, di mana agregat halus umumnya memiliki berat jenis berkisar antara 1,6–3,3 gr/cm³.

4.1.2 Semen

Pengujian material semen merupakan tahapan penting untuk mengetahui kualitas dan karakteristik semen sebagai bahan pengikat dalam campuran genteng beton. Karakteristik semen akan memengaruhi proses pengerasan, daya ikat antar material, serta kekuatan akhir genteng beton yang dihasilkan. Oleh karena itu, dilakukan beberapa pengujian guna memastikan bahwa semen yang digunakan memenuhi ketentuan standar dan sesuai untuk digunakan dalam proses pembuatan campuran. Data hasil pengujian semen selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam perencanaan *mix design*.

a. Keadaan Kemasan Semen

Berdasarkan hasil pemeriksaan secara visual, kondisi kemasan semen berada dalam keadaan baik dan tidak mengalami kerusakan. Kemasan semen tidak ditemukan adanya sobekan, kebocoran, maupun tanda-tanda terkena kelembapan yang dapat memengaruhi kualitas material di dalamnya. Selain itu, semen yang berada di dalam kemasan tidak mengalami penggumpalan sehingga menunjukkan bahwa kondisi penyimpanan masih terjaga dengan baik. Dengan demikian, semen yang digunakan dalam penelitian ini dinyatakan layak digunakan sebagai bahan campuran pembuatan genteng beton.

b. Tampak Butiran Semen

Hasil pemeriksaan tampak butiran semen menunjukkan bahwa semen memiliki butiran yang halus, kering, dan mudah terurai saat disentuh. Tidak ditemukan adanya gumpalan keras maupun butiran yang menggumpal akibat pengaruh air atau kelembapan udara. Kondisi tersebut menandakan bahwa semen masih dalam keadaan baik dan belum mengalami penurunan mutu. Dengan demikian, semen yang digunakan memenuhi syarat untuk digunakan sebagai bahan pengikat dalam campuran genteng beton.

c. Konsistensi Normal Semen

Pengujian ini dilakukan melalui pengamatan terhadap kondisi pasta semen setelah bereaksi dengan air untuk memastikan bahwa semen masih memiliki kemampuan hidrasi yang baik. Di bawah adalah hasil penetapan konsistensi normal semen portland.

Tabel 4.4 Tabel Konsistensi Normal

No.	Berat Semen (gr)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)
1	300	28	6	30
2	300	28,5	8	30
3	300	29	15	30

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Interpolasi:

$$Y = Y1 + \frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \times (Y2 - Y1)$$

Dengan :

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

maka,

$$Y = Y1 + \frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \times (Y2 - Y1)$$

$$Y = 28,5\% + \frac{(10-8)}{(15-8)} \times (29 - 28,5) \%$$

$$Y = 28,5 + \frac{2}{7} \times 0,5\%$$

$$Y = 28,643\%$$

Berdasarkan hasil pengujian penetapan konsistensi normal semen portland menurut SNI 03-6826-2002, diperoleh nilai konsistensi normal sebesar 28,643%. Nilai tersebut diperoleh melalui metode interpolasi berdasarkan hasil penetrasi jarum vicat, di mana pada kadar air 28,5% diperoleh penurunan jarum sebesar 8 mm dan pada kadar air 29% diperoleh penurunan jarum sebesar 15 mm. Dari hasil interpolasi untuk penurunan jarum sebesar 10 mm, diperoleh persentase air sebesar 28,643%. Dari hasil pengujian penetapan konsistensi normal pada persentase air sebesar 28,643% dapat digunakan untuk pengujian waktu ikat awal semen portland.

d. Daya Ikat Semen

Pengujian daya ikat semen dilakukan untuk mengetahui kemampuan semen dalam mengikat material penyusun campuran sehingga dapat membentuk massa yang padat dan kuat. Daya ikat semen menjadi salah satu faktor penting

yang memengaruhi proses pengerasan serta kualitas genteng beton yang dihasilkan. Hasil uji daya ikat semen dapat dilihat pada **Tabel 4.5**.

Tabel 4.5 Hasil Uji Daya Ikat Semen

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

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Interpolasi :

$$Y = Y1 + \frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \times (Y2 - Y1)$$

Dengan :

Y = Waktu penurunan jarum tepat berada 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 pada penurunan jarum 26 mm (135 menit)

Y2 = Waktu pada penurunan jarum 19 mm (150 menit)

maka,

$$Y = Y1 + \frac{(X-X1)}{(X2-X1)} \times (Y2 - Y1)$$

$$Y = 135 + \frac{(25-26)}{(19-26)} \times (150 - 135) \%$$

$$Y = 135 + \frac{-1}{-7} \times 15$$

$$Y = 137,143 \text{ menit}$$

Berdasarkan hasil pengujian waktu ikat awal semen portland menurut SNI 03-6826-2002, diperoleh data penurunan jarum vicat yang mengalami penurunan secara bertahap seiring bertambahnya waktu pengujian. Penentuan waktu ikat awal dilakukan pada kondisi penurunan jarum mencapai 25 mm. Dari hasil pengamatan, pada waktu 135 menit diperoleh penurunan jarum sebesar 26 mm, sedangkan pada waktu 150 menit diperoleh penurunan jarum sebesar 19 mm. Oleh karena itu, dilakukan interpolasi untuk menentukan waktu pada saat penurunan jarum tepat berada pada angka 25 mm.

Hasil interpolasi menunjukkan bahwa waktu ikat awal semen Portland diperoleh sebesar 137,143 menit atau sekitar 2 jam 17 menit. Hal tersebut sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 15-2049-2004, yang menyatakan bahwa batas maksimum waktu ikat akhir semen adalah 375 menit.

4.1.3 Serbuk Kaca

Pengujian material substitusi agregat halus berupa serbuk kaca dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik material yang akan digunakan sebagai pengganti sebagian pasir dalam campuran genteng beton. Serbuk kaca dipilih sebagai bahan substitusi karena memiliki kandungan silika yang tinggi serta berpotensi meningkatkan kepadatan dan kekuatan produk, sekaligus mendukung pemanfaatan limbah secara berkelanjutan. Sebelum digunakan dalam proses pencampuran, serbuk kaca perlu diuji untuk mengetahui sifat-sifatnya, seperti gradasi butiran dan berat jenis yang dapat memengaruhi kualitas campuran. Hasil pengujian ini menjadi dasar dalam menentukan kelayakan serta proporsi penggunaan serbuk kaca pada *mix design* genteng beton ramah lingkungan.

a. Berat Jenis

Pengujian berat jenis serbuk kaca dilakukan untuk mengetahui nilai *specific gravity* material substitusi agregat halus yang digunakan dalam campuran genteng beton. Nilai berat jenis serbuk kaca diperlukan dalam perencanaan *mix design* karena berpengaruh terhadap perhitungan proporsi campuran.

Tabel 4.6 Hasil Uji Berat Jenis Serbuk Kaca

No.	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1	Berat Piknometer Kosong (Wa)	gr	173,1
2	Berat Piknometer + Aquades (Wb)	gr	667
3	Suhu Piknometer + Aquades (t)	°C	31
4	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades (T1)	°C	0,965
5	Harga Air Piknometer (Wt) = (Wb-Wa) x (T1)	gr	476,6135
6	Berat Piknometer + Serbuk Kaca (Wc)	gr	374,2
7	Berat Piknometer + Serbuk Kaca + Aquades (Wd)	gr	787,1
8	Suhu Piknometer + Aquades + Serbuk Kaca (t)	°C	30
9	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades + Serbuk Kaca (T2)	°C	0,958
10	Berat Jenis	gr/cm ³	2,481

$$Gs = \frac{W_c - W_a}{Wt - (W_d - W_c) \times T_2}$$

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Nilai berat jenis sebesar 2,481 gr/cm³ menunjukkan bahwa serbuk kaca memiliki karakteristik fisik yang mendekati agregat halus pada umumnya sehingga dapat digunakan sebagai material substitusi dalam campuran genteng beton. Data berat jenis ini digunakan sebagai dasar dalam perencanaan *mix design*, terutama dalam menentukan proporsi campuran.

b. Analisa Saringan Serbuk Kaca

Pengujian gradasi saringan serbuk kaca dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran material substitusi agregat halus yang digunakan dalam campuran genteng beton. Distribusi ukuran butiran serbuk kaca sangat berpengaruh terhadap tingkat kepadatan campuran, *workability*, serta ikatan antar material dalam beton. Hasil evaluasi terhadap gradasi butiran serbuk kaca yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4.7 Hasil Gradasi Butiran Serbuk Kaca

Saringan		Berat Tertahan	Persentase Berat Tertahan	Persentase Berat Tertahan Kumulatif	Persentase Lolos Kumulatif
Ukuran (mm)	No. Saringan	Gram (a)	% (b) = (a) / W	% (c)	% (d) = 100 - (c)
9.5	3/8	0	0	0	100
4.75	4	29,60	2,96	2,96	97,04
2.36	8	62,70	6,27	9,23	90,77
1.18	16	262,80	26,28	35,51	64,49
0.60	30	193,50	19,35	54,86	45,14
0.30	50	223,50	22,35	77,21	22,79
0.15	100	147,60	14,76	91,97	8,03
Pan		78,40	7,84	99,81	0
Total (W)		998,10	99,81	371,55	

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian gradasi yang telah dilakukan, diperoleh data yang kemudian dianalisis dan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$MHB = \frac{\Sigma \text{ Berat Tertinggal Kumulatif}}{100}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned}
 \text{Berat tertinggal (\%)} &= \frac{\text{Berat tertinggal}}{\text{Berat total}} \times 100\% \\
 &= \frac{29,60}{998,1} \times 100\% \\
 &= 2,97\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat tertinggal kumulatif} &= \text{Persentase berat tertinggal} + \text{persentase Berat tertinggal sebelumnya} \\
 &= 2,97\% + 0\% \\
 &= 2,97\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Lolos kumulatif (\%)} &= 100\% - \text{Persentase berat tertinggal} \\
 &= 100\% - 2,97\% \\
 &= 97,03\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus halus butir} &= \frac{\Sigma \text{ berat tertinggal kumulatif}}{100} \\
 &= \frac{371,550}{100} \times 100\% \\
 &= 3,72\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian gradasi serbuk kaca, diperoleh nilai modulus butir halus sebesar 3,72%. Mengacu pada ketentuan SNI 03-1972-1990, nilai modulus butir halus agregat halus yang diperbolehkan berada pada rentang 1,5%–3,8%. Oleh karena itu, hasil pengujian yang diperoleh masih termasuk dalam batas standar yang ditetapkan, sehingga serbuk kaca yang digunakan dinyatakan memenuhi persyaratan gradasi agregat halus.

4.1.4 Abu Tempurung Kelapa

Pengujian material substitusi semen berupa abu tempurung kelapa dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik material yang akan digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam campuran genteng beton. Pengujian ini meliputi pemeriksaan berat jenis untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kebutuhan air, proses hidrasi, serta proporsi campuran pada *mix design*.

a. Berat Jenis

Pengujian berat jenis abu tempurung kelapa dilakukan untuk mengetahui nilai *specific gravity* material substitusi semen yang digunakan dalam campuran genteng beton. Nilai berat jenis ini digunakan sebagai dasar dalam perencanaan *mix design* untuk menentukan proporsi campuran. Pada **Tabel 4.8** di bawah merupakan hasil pengujian berat jenis abu tempurung kelapa.

Tabel 4.8 Berat Jenis Abu Tempurung Kelapa

No.	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1	Berat Piknometer Kosong (W_a)	gr	211,7
2	Berat Piknometer + Aquades (W_b)	gr	709,2
3	Suhu Piknometer + Aquades (t)	°C	29
4	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades (T_1)	°C	0,965
5	Harga Air Piknometer (W_t) = $(W_b - W_a) \times (T_1)$	gr	480,0875
6	Berat Piknometer + Abu Tempurung Kelapa (W_c)	gr	300

No.	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
7	Berat Piknometer + Abu Tempurung Kelapa + Aquades (Wd)	gr	711,5
8	Suhu Piknometer + Aquades + Abu Tempurung Kelapa (t)	°C	30
9	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades + Abu Tempurung Kelapa (T2)	°C	0,958
10	Berat Jenis	gr/cm ³	1,028

$$Gs = \frac{W_c - W_a}{Wt - (W_d - W_c) \times T_2}$$

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai berat jenis abu tempurung kelapa sebesar 1,028 gr/cm³. Dari hasil tersebut tidak memenuhi nilai berat jenis bahan tambah mineral yang ada dalam SNI 15-2531-1991. Namun, abu tempurung kelapa memiliki kandungan silika sebesar 33,74% dan dapat digunakan untuk substitusi sebagian semen (Santosa et al, 2023). Dimana kandungan tersebut lebih tinggi dibandingkan kandungan silika dalam semen yang berkisar 19-25% dari berat keseluruhan semen.

- b. Pengujian Konsistensi Normal Semen Substitusi Abu Tempurung Kelapa 5%
 Pengujian daya ikat semen substitusi abu tempurung kelapa dilakukan untuk mengetahui kemampuan campuran semen dan abu tempurung kelapa dalam mengikat material penyusun genteng beton. Di bawah adalah hasil penetapan konsistensi normal semen portland yang disubstitusi dengan abu tempurung kelapa sebanyak 5%. Hasil dapat dilihat pada **Tabel 4.9**.

Tabel 4.9 Hasil Uji Konsistensi Normal Subs. Abu Tempurung Kelapa 5%

No.	Berat Semen (gr)	Berat Abu Tempurung Kelapa 5% (gr)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)
1	285	15	28	9	30

No.	Berat Semen (gr)	Berat Abu Tempurung Kelapa 5% (gr)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)
2	285	15	28,5	10	30

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran semen dengan substitusi abu tempurung kelapa 5% mencapai kondisi konsistensi atau daya ikat normal pada kadar air 28,5%, yaitu ketika penurunan tepat berada pada angka 10 mm. Dengan demikian, persentase air sebesar 28,5% dapat digunakan untuk pengujian waktu ikat awal semen.

c. Daya Ikat Semen Substitusi Abu Tempurung Kelapa 5%

Setelah dilakukan pengujian konsistensi normal, didapatkan hasil persentase air sebesar 28,5% yang dapat digunakan untuk pengujian waktu ikat awal semen. Berikut merupakan hasil pengujiannya dapat dilihat pada **Tabel 4.10**.

Tabel 4.10 Hasil Uji Daya Ikat Semen Substitusi Abu Tempurung Kelapa 5%

No.	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)
1	0	45	30
2	15	45	30
3	30	45	30
4	45	45	30
5	60	42	30
6	75	37	30
7	90	25	30

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu ikat awal campuran semen substitusi abu tempurung kelapa terjadi pada menit ke-90, yaitu saat penurunan jarum mencapai 25 mm sesuai parameter pengujian vicat. Hal tersebut sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 15-2049-2004,

yang menyatakan bahwa batas maksimum waktu ikat akhir semen adalah 375 menit.

- d. Pengujian Konsistensi Normal Semen Substitusi Abu Tempurung Kelapa 10%
Pengujian daya ikat semen dengan substitusi abu tempurung kelapa dilakukan untuk mengetahui kemampuan campuran semen dan abu tempurung kelapa dalam mengikat material penyusun genteng beton. Adapun hasil penetapan konsistensi normal semen portland yang disubstitusi abu tempurung kelapa sebesar 10% disajikan pada **Tabel 4.11**.

Tabel 4.11 Hasil Uji Konsistensi Normal Subs. Abu Tempurung Kelapa 10%

No.	Berat Semen (gr)	Berat Abu Tempurung Kelapa 10% (gr)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)
1	270	30	28	4	30
2	270	30	29	10	30

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran semen dengan substitusi abu tempurung kelapa 10% mencapai kondisi konsistensi normal pada kadar air 29%, yaitu ketika penurunan tepat berada pada angka 10 mm. Dengan demikian, persentase air sebesar 29% dapat digunakan untuk pengujian waktu ikat awal semen.

- e. Daya Ikat Semen Substitusi Abu Tempurung Kelapa 10%
Setelah dilakukan pengujian konsistensi normal, didapatkan hasil persentase air sebesar 29% yang dapat digunakan untuk pengujian waktu ikat awal semen. Berikut merupakan hasil pengujian daya ikat semen substitusi abu tempurung kelapa 10% dapat dilihat pada **Tabel 4.12**.

Tabel 4.12 Hasil Uji Daya Ikat Semen Substitusi Abu Tempurung Kelapa 10%

No.	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)
1	0	43	30
2	15	43	30
3	30	43	30
4	45	42	30
5	60	41	30
6	75	34	30
7	90	25	30

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu ikat awal campuran semen dengan substitusi abu tempurung kelapa 10% terjadi pada menit ke-90, yaitu saat penurunan jarum mencapai 25 mm sesuai parameter pengujian vicat. Hal tersebut sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam SNI 15-2049-2004, yang menyatakan bahwa batas maksimum waktu ikat akhir semen adalah 375 menit.

4.2. Hasil Pengujian Genteng Beton

Pengujian genteng beton berdasarkan SNI 0096:2007 meliputi pengujian sifat tampak, ukuran, kerataan, penyerapan air, rembesan air, dan beban lentur. Pengujian tersebut dilakukan untuk mengetahui kualitas dan kelayakan genteng beton yang dihasilkan. Adapun hasil dari masing-masing pengujian disajikan sebagai berikut.

4.2.1 Dimensi Genteng Beton

Pengukuran dimensi genteng beton dilakukan pada bagian tebal, kaitan, dan penumpangan menggunakan alat ukur berupa jangka sorong dan meteran. Pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui kesesuaian ukuran genteng beton yang dihasilkan pada setiap variasi campuran. Adapun hasil pengukuran dimensi genteng beton disajikan pada **Tabel 4.13**.

Tabel 4.13 Hasil Pengujian Dimensi Genteng

a. Variasi Gga

Bagian Yang Diuji	Gga1	Gga2	Gga3	Rata-rata
Tebal				
Bagian Yang Rata	19,3 mm	19,1 mm	18,9 mm	19,1 mm
Penumpangan	18,7 mm	17,3 mm	17,2 mm	17,7 mm
Kaitan				
Panjang	300 mm	300 mm	303 mm	301 mm
Lebar	16,6 mm	17,3 mm	13,2 mm	15,7 mm
Tinggi	13,3 mm	10,3 mm	12,7 mm	12,1 mm
Penumpangan				
Lebar	41 mm	40 mm	40 mm	40,3 mm
Kedalaman Alur	29 mm	30 mm	28 mm	29 mm
Jumlah Alur	2	2	2	2

b. Variasi Ggb

Bagian Yang Diuji	Ggb1	Ggb2	Ggb3	Rata-rata
Tebal				
Bagian Yang Rata	18,5 mm	18,8 mm	19,4 mm	18,9 mm
Penumpangan	19,2 mm	18,9 mm	18,2 mm	18,8 mm
Kaitan				
Panjang	301 mm	302 mm	301 mm	301,3 mm
Lebar	18,6 mm	17,1 mm	19,6 mm	18,4 mm
Tinggi	10,5 mm	12,1 mm	12 mm	11,5 mm
Penumpangan				
Lebar	40,2 mm	39 mm	41 mm	40,1 mm
Kedalaman Alur	30 mm	31 mm	28 mm	29,7 mm
Jumlah Alur	2	2	2	2

c. Variasi Ggc

Bagian Yang Diuji	Ggc1	Ggc2	Ggc3	Rata-rata
Tebal				
Bagian Yang Rata	19,2 mm	19,5 mm	20 mm	19,6 mm
Penumpangan	15,7 mm	17,9 mm	17,8 mm	17,1 mm

Bagian Yang Diuji	Ggc1	Ggc2	Ggc3	Rata-rata
Kaitan				
Panjang	300 mm	302 mm	301 mm	301 mm
Lebar	17 mm	17 mm	18,1 mm	17,4 mm
Tinggi	12,3 mm	12,3 mm	14,2 mm	12,9 mm
Penumpangan				
Lebar	40 mm	41,5 mm	41 mm	40,8 mm
Kedalaman Alur	30 mm	30 mm	32 mm	30,7 mm
Jumlah Alur	2	2	2	2

d. Variasi Ggd

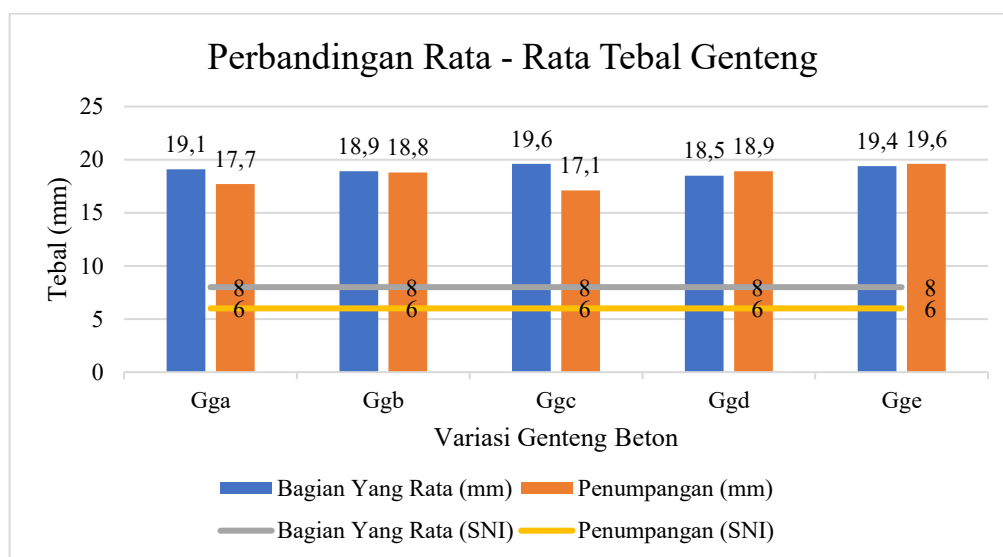
Bagian Yang Diuji	Ggd1	Ggd2	Ggd3	Rata-rata
Tebal				
Bagian Yang Rata	18,5 mm	19,2 mm	17,9 mm	18,5 mm
Penumpangan	19,2 mm	18,5 mm	19 mm	18,9 mm
Kaitan				
Panjang	301 mm	300 mm	300 mm	300,3 mm
Lebar	18,7 mm	18,7 mm	18,7 mm	18,7 mm
Tinggi	10 mm	10 mm	10 mm	10 mm
Penumpangan				
Lebar	42 mm	40 mm	39 mm	40,3 mm
Kedalaman Alur	28 mm	28 mm	29 mm	28,3 mm
Jumlah Alur	2	2	2	2

e. Variasi Gge

Bagian Yang Diuji	Gge1	Gge2	Gge3	Rata-rata
Tebal				
Bagian Yang Rata	19,4 mm	18,9 mm	20 mm	19,4 mm
Penumpangan	19,5 mm	19,4 mm	19,8 mm	19,6 mm
Kaitan				
Panjang	300 mm	300 mm	300 mm	300 mm
Lebar	17,8 mm	17,8 mm	17,8 mm	17,8 mm
Tinggi	10,4 mm	10,4 mm	10,4 mm	10,4 mm

Bagian Yang Diuji	Gge1	Gge2	Gge3	Rata-rata
Penumpangan				
Lebar	41 mm	42 mm	40 mm	41 mm
Kedalaman Alur	28 mm	28 mm	27 mm	27,7 mm
Jumlah Alur	2	2	2	2

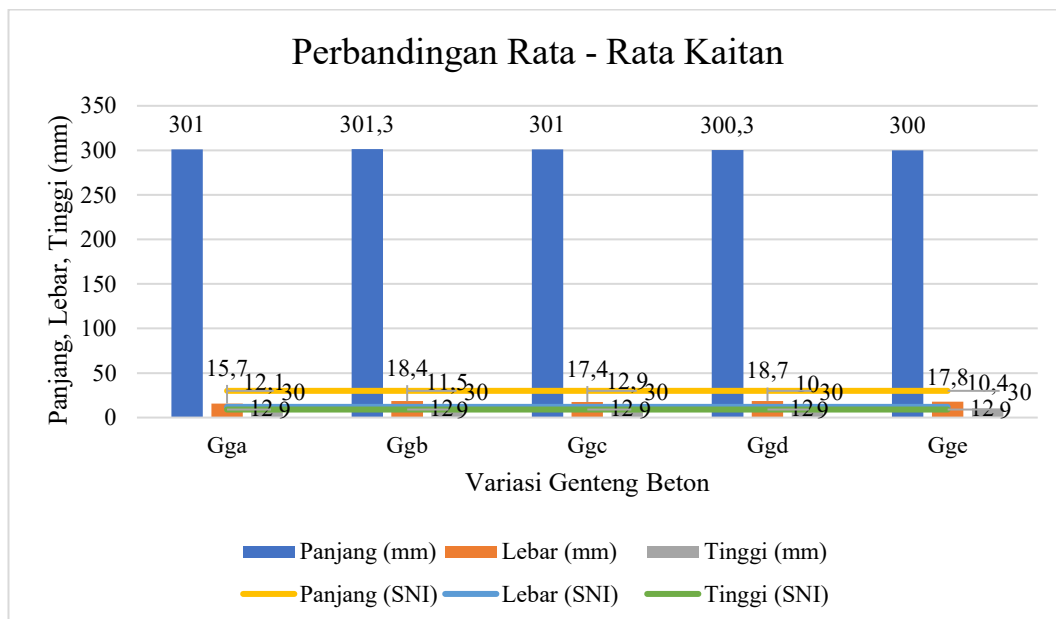
Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4.1. Grafik Perbandingan Rata - Rata Tebal Genteng

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

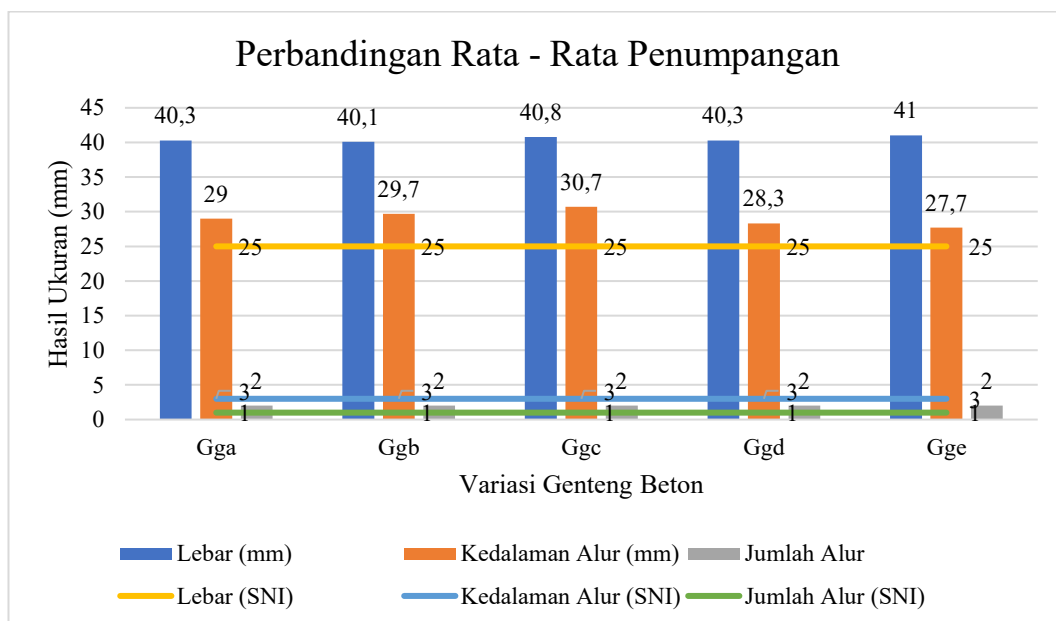
Berdasarkan grafik 4.1, variasi Gga hingga Gge menunjukkan ukuran ketebalan yang hampir seragam, yakni dengan tebal bagian rata sekitar 18,5 – 19,6 mm dan bagian penumpangan sekitar 17,1 – 19,6 mm. Berbeda halnya dengan variasi Ggc yang memperlihatkan selisih ukuran cukup mencolok dibandingkan variasi lainnya. yaitu tebal bagian rata sebesar 19,6 mm namun bagian penumpangan hanya 17,1 mm, sehingga selisihnya mencapai 2,5 mm. Kondisi ini terjadi karena proses pencetakan genteng beton dilakukan secara manual menggunakan cetakan berbahan *fiberglass*, sehingga posisi cetakan yang diletakkan di atas genteng beton tidak selalu konsisten dan seragam, yang pada akhirnya mengakibatkan perbedaan dimensi pada hasil cetakan.



Gambar 4.2. Grafik Perbandingan Rata - Rata Kaitan

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Gambar 4.2 menampilkan perbandingan rata-rata ukuran kaitan genteng beton yang secara keseluruhan menghasilkan dimensi yang relatif seragam. Ukuran kaitan terpanjang ditemukan pada variasi Ggb dengan panjang mencapai 301,3 mm atau setara 30,13 cm. Sementara itu, variasi Ggc hingga Ggd menunjukkan hasil ukuran panjang yang lebih konsisten, dengan lebar dan tinggi yang seragam di seluruh variasi tersebut. Adanya ketidakseragaman ukuran yang cukup signifikan pada variasi Ggb, serupa dengan variasi Gga, disebabkan oleh pemasangan cetakan yang kurang presisi. Selain itu, ketika cetakan diangkat setelah proses pencetakan selesai, adonan genteng beton yang berada di bagian tepi cenderung melorot ke bawah, sehingga menimbulkan perbedaan dimensi pada masing-masing genteng beton yang dihasilkan.



Gambar 4.3. Grafik Perbandingan Rata - Rata Penumpangan

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berbeda dengan grafik sebelumnya, gambar 4.3 menyajikan perbandingan rata-rata ukuran penumpangan genteng beton. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa seluruh variasi memiliki dimensi yang seragam, yaitu lebar penumpangan sekitar 40,1 – 41 mm dengan kedalaman alur berkisar 28,3 – 30,7 mm. Jika ditinjau dari ketiga diagram tersebut secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa semua bagian genteng beton telah memenuhi standar ukuran yang ditetapkan dalam SNI 0096:2007. Meskipun terdapat beberapa perbedaan dimensi yang kemungkinan dipengaruhi oleh proses pembuatan secara manual dengan penggunaan tatakan yang bervariasi, selisih ukuran yang dihasilkan tidak terlalu berarti, yakni hanya berkisar antara 0,2 hingga 2,4 mm.

4.2.2 Uji Sifat Tampak

Pengujian tampak pada genteng beton dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi kondisi visual dari permukaan genteng beton yang dihasilkan. Mengacu pada ketentuan SNI 0096:2007, genteng beton disyaratkan bebas dari retak serta memiliki permukaan yang rata dan halus. Adapun hasil pengujian tampak tersebut dapat diamati pada tabel 4.14 berikut ini.

Tabel 4.14 Hasil Pengujian Sifat Tampak

Variasi	Benda Uji	Hasil Sifat Tampak	Dokumentasi	Keterangan
Gga	Gga1	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
	Gga2	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
	Gga3	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
Ggb	Ggb1	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
	Ggb2	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
	Ggb3	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
Ggc	Ggc1	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
	Ggc2	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
	Ggc3	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi

Variasi	Benda Uji	Hasil Sifat Tampak	Dokumentasi	Keterangan
Ggd	Ggd1	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
	Ggd2	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
	Ggd3	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
Gge	Gge1	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi
	Gge2	Permukaan sedikit bergeronjal, tidak terdapat retak		Tidak Memenuhi
	Gge3	Kondisi permukaan rata, halus, dan tidak ditemukan adanya retak		Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilaksanakan, secara umum seluruh variasi yang dibuat telah memenuhi persyaratan SNI 0096:2007. Meskipun demikian, pada variasi Gge (10% + 10%) ditemukan satu benda uji yang tidak lolos pengujian akibat permukaan yang bergeronjal. Terlepas dari hal tersebut, secara keseluruhan genteng beton yang dihasilkan tetap dinyatakan memenuhi standar SNI 0096:2007 ditinjau dari aspek tampak maupun visual.

4.2.3 Uji Kerataan

Pengujian kerataan genteng beton dilaksanakan dengan memanfaatkan batang baja berdiameter 3 mm sebagai alat ukur. Adapun hasil dari pengujian kerataan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.15 berikut ini.

Tabel 4.15 Hasil Pengujian Kerataan

Variasi	Benda Uji	Kerataan	Dokumentasi
Gga	Gga1	Tidak Melebihi 3 mm	
	Gga2	Tidak Melebihi 3 mm	
	Gga3	Tidak Melebihi 3 mm	
Ggb	Ggb1	Tidak Melebihi 3 mm	
	Ggb2	Tidak Melebihi 3 mm	
	Ggb3	Tidak Melebihi 3 mm	
Ggc	Ggc1	Tidak Melebihi 3 mm	
	Ggc2	Tidak Melebihi 3 mm	
	Ggc3	Tidak Melebihi 3 mm	
Ggd	Ggd1	Tidak Melebihi 3 mm	
	Ggd2	Tidak Melebihi 3 mm	
	Ggd3	Tidak Melebihi 3 mm	
Gge	Gge1	Tidak Melebihi 3 mm	
	Gge2	Tidak Melebihi 3 mm	
	Gge3	Tidak Melebihi 3 mm	

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh, seluruh variasi genteng beton yang meliputi variasi Gga (0%, + 0%), Ggb (7,5%, + 5%), Ggc (10%, + 5%), Ggd (7,5%, + 10%), dan Gge (10%, + 10%) telah dinyatakan memenuhi persyaratan SNI 0096:2007 dengan nilai kerataan maksimum sebesar 3 mm.

4.2.4 Uji Beban Lentur

Pengujian beban lentur genteng beton dilaksanakan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM). Nilai beban lentur minimum yang disyaratkan

untuk genteng beton pada penelitian ini adalah sebesar 1400 N karena genteng beton yang dibuat memiliki lebar penutup ≥ 300 mm dan tinggi profil $20 \geq t \geq 5$ mm. Pengujian tersebut dilakukan ketika genteng beton telah mencapai umur 28 hari. Adapun hasil pengujian beban lentur genteng beton pada umur 28 hari dapat diamati pada Tabel 4.16 berikut ini.

Tabel 4.16 Hasil Pengujian Beban Lentur

Variasi	Benda Uji	Berat Genteng (Kg)	Tebal Genteng (mm)	Nilai Beban Lentur 28 H (N)	Rata-Rata (N)
Gga	Gga1	5,595	19,3	1450	1436,67
	Gga2	4,990	19,1	1440	
	Gga3	5,280	18,9	1420	
Ggb	Ggb1	5,355	18,5	1470	1473,33
	Ggb2	5,755	18,8	1460	
	Ggb3	5,405	19,4	1490	
Ggc	Ggc1	4,820	19,2	1640	1686,67
	Ggc2	5,320	19,5	1700	
	Ggc3	4,910	20	1720	
Ggd	Ggd1	5,595	18,5	1740	1683,33
	Ggd2	5,555	19,2	1680	
	Ggd3	5,020	17,9	1630	
Gge	Gge1	5,225	19,4	1880	1813,33
	Gge2	4,945	18,9	1760	
	Gge3	5,330	20	1800	

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Data dari hasil pengujian akan dihitung menggunakan rumus dan persamaan di bawah.

1. Variasi Gga

$$F_i = Gga1 = 1450 \text{ N}$$

$$Gga2 = 1440 \text{ N}$$

$$Gga3 = 1420 \text{ N}$$

$$F = \frac{Gga1 + Gga2 + Gga3}{3}$$

$$F = \frac{1450 + 1440 + 1420}{3}$$

$$F = 1436,67 \text{ N}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (Gga1 - F)^2 + (Gga2 - F)^2 + (Gga3 - F)^2}{3}}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (1450 - 1436,67)^2 + (1440 - 1436,67)^2 + (1420 - 1436,67)^2}{3}}$$

$$Sd = 12,472 \text{ N}$$

$$Fc = F - 1,64 \times Sd$$

$$Fc = 1436,67 - 1,64 \times 12,472$$

$$Fc = 1416,21 \text{ N}$$

Berarti, nilai beban lentur dari variasi Gga adalah 1416,21 N

2. Variasi Ggb

$$F_i = Ggb1 = 1470 \text{ N}$$

$$Ggb2 = 1460 \text{ N}$$

$$Ggb3 = 1490 \text{ N}$$

$$F = \frac{Ggb1 + Ggb2 + Ggb3}{3}$$

$$F = \frac{1470 + 1460 + 1490}{3}$$

$$F = 1473,33 \text{ N}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (Ggb1-F)^2 + (Ggb2-F)^2 + (Ggb3-F)^2}{3}}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (1470-1473,33)^2 + (1460-1473,33)^2 + (1490-1473,33)^2}{3}}$$

$$S_d = 12,472 \text{ N}$$

$$F_c = F - 1,64 \times S_d$$

$$F_c = 1473,33 - 1,64 \times 12,472$$

$$F_c = 1452,88 \text{ N}$$

Berarti, nilai beban lentur dari variasi Ggb adalah 1452,88 N

3. Variasi Ggc

$$F_i = Ggc1 = 1640 \text{ N}$$

$$Ggc2 = 1700 \text{ N}$$

$$Ggc3 = 1720 \text{ N}$$

$$F = \frac{Ggc1+Ggc2+Ggc3}{3}$$

$$F = \frac{1640+1700+1720}{3}$$

$$F = 1686,67 \text{ N}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (Ggc1-F)^2 + (Ggc2-F)^2 + (Ggc3-F)^2}{3}}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (1640-1686,67)^2 + (1700-1686,67)^2 + (1720-1686,67)^2}{3}}$$

$$S_d = 33,993 \text{ N}$$

$$F_c = F - 1,64 \times S_d$$

$$F_c = 1686,67 - 1,64 \times 33,993$$

$$F_c = 1630,92 \text{ N}$$

Berarti, nilai beban lentur dari variasi Ggc adalah 1630,92 N

4. Variasi Ggd

$$F_i = G_{gd1} = 1740 \text{ N}$$

$$G_{gd2} = 1680 \text{ N}$$

$$G_{gd3} = 1630 \text{ N}$$

$$F = \frac{G_{gd1} + G_{gd2} + G_{gd3}}{3}$$

$$F = \frac{1740 + 1680 + 1630}{3}$$

$$F = 1683,33 \text{ N}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (G_{gd1} - F)^2 + (G_{gd2} - F)^2 + (G_{gd3} - F)^2}{3}}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (1740 - 1683,33)^2 + (1680 - 1683,33)^2 + (1630 - 1683,33)^2}{3}}$$

$$S_d = 44,969 \text{ N}$$

$$F_c = F - 1,64 \times S_d$$

$$F_c = 1683,33 - 1,64 \times 44,969$$

$$F_c = 1609,58 \text{ N}$$

Berarti, nilai beban lentur dari variasi Ggd adalah 1609,58 N

5. Variasi Gge

$$F_i = G_{ge1} = 1880 \text{ N}$$

$$G_{ge2} = 1760 \text{ N}$$

$$G_{ge3} = 1800 \text{ N}$$

$$F = \frac{G_{ge1} + G_{ge2} + G_{ge3}}{3}$$

$$F = \frac{1880+1760+1800}{3}$$

$$F = 1813,33 \text{ N}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum(Gge1-F)^2+(Gge2-F)^2+(Gge3-F)^2}{3}}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum(1880-1813,33)^2+(1760-1813,33)^2+(1800-1813,33)^2}{3}}$$

$$Sd = 49,888 \text{ N}$$

$$Fc = F - 1,64 \times Sd$$

$$Fc = 1813,33 - 1,64 \times 49,88$$

$$Fc = 1731,52 \text{ N}$$

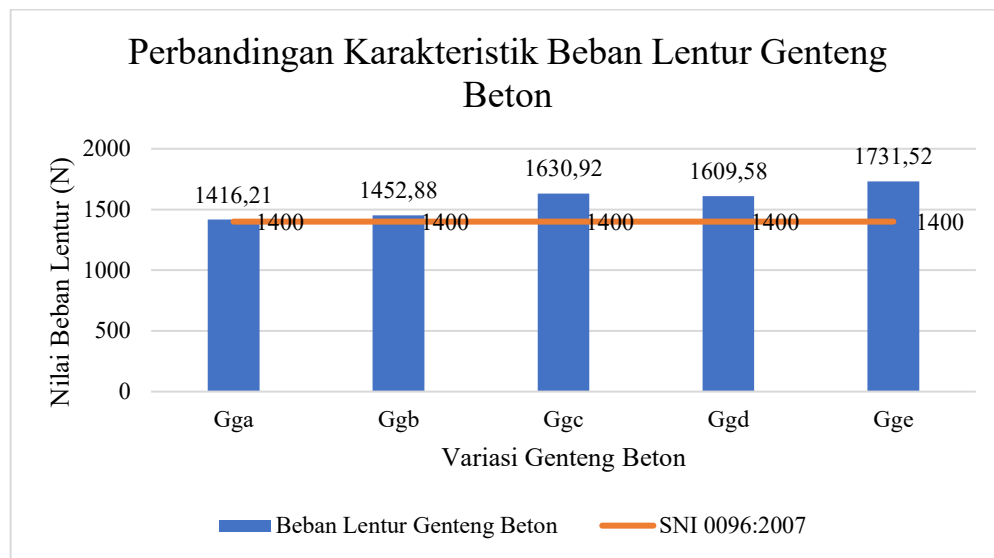
Berarti, nilai beban lentur dari variasi Gge adalah 1731,52 N

Hasil perhitungan beban lentur pada setiap variasi selanjutnya direkapitulasi dalam dan disajikan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Rekapitulasi Karakteristik Beban Lentur Genteng 28 Hari

Variasi	Nilai Beban Lentur	Nilai Beban Lentur
	28H (N)	Rencana SNI 0096:2007
Gga	1416,21	≥ 1400
Ggb	1452,88	≥ 1400
Ggc	1630,92	≥ 1400
Ggd	1609,58	≥ 1400
Gge	1731,52	≥ 1400

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Karakteristik Beban Lentur Genteng Beton 28 Hari

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan Gambar 4.4, menunjukkan peningkatan persentase substitusi serbuk kaca cenderung diikuti oleh peningkatan nilai beban lentur genteng beton. Pada variasi Ggb terjadi peningkatan beban lentur sebesar 2,59% dibandingkan variasi kontrol (Gga), dan peningkatan juga terlihat pada variasi berikutnya. Namun, pada variasi Ggd terjadi penurunan beban lentur sebesar 1,31% dibandingkan variasi Ggc, yang mengindikasikan bahwa substitusi abu tempurung kelapa sebesar 10% masih memberikan kontribusi terhadap peningkatan kemampuan menahan beban lentur pada kondisi tertentu.

Peningkatan beban lentur akibat substitusi serbuk kaca sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase serbuk kaca, maka nilai beban lentur yang dihasilkan cenderung menurun. Penelitian oleh Arkhanditya dkk. (2024) menunjukkan bahwa nilai kuat lentur tertinggi diperoleh pada substitusi serbuk kaca sebesar 10% dengan nilai 1751,43 N. Selain itu, pada penelitian sebelumnya hasil uji beban lentur menunjukkan bahwa nilai beban lentur dengan variasi persentase serbuk kaca 0%, 5%, 10%, dan 15% adalah masing-masing 50 kg, 62 kg, 72 kg, serta 63 kg. Dengan demikian, persentase serbuk kaca 10% memiliki nilai peningkatan beban lentur yang paling tinggi (Pratiwi et al.,

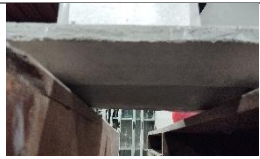
2014). Menurut SPI Wijaya. (2023) serbuk kaca berfungsi sebagai material pengisi yang mampu menutup rongga-rongga pada benda uji sehingga strukturnya menjadi lebih padat.

Oleh karena itu, pemanfaatan limbah serbuk kaca dapat berkontribusi dalam mengisi rongga, yang pada akhirnya berpotensi meningkatkan beban lentur genteng beton. Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa proses pencampuran (*mixing*) harus dilakukan dengan cermat agar limbah serbuk kaca terdistribusi secara merata dan tidak mengalami penggumpalan. Di sisi lain, penggunaan abu tempurung kelapa juga perlu dibatasi secara proporsional, mengingat penambahan yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan kuat lentur secara signifikan. Pemanfaatan abu tempurung kelapa dijadikan alternatif substitusi semen untuk memanfaatkan limbah sebagai upaya menjaga kelestarian lingkungan.

4.2.5 Uji Rembesan Air (Impermeabilitas)

Pengujian rembesan air pada genteng beton dilaksanakan dengan cara menggenangkan air di atas permukaan genteng beton setinggi 15 mm menggunakan bantuan seng selama 20 jam 5 menit dan suhu ruangan 30°C. Adapun hasil pengujian rembesan air tersebut dapat dilihat secara lengkap pada tabel 4.18 berikut ini.

Tabel 4.18 Hasil Pengujian Rembesan Air (Impermeabilitas)

Variasi	Benda Uji	Rembesan	Dokumentasi
Gga	Gga1	Tidak terjadi rembesan	
	Gga2	Tidak terjadi rembesan	
	Gga3	Tidak terjadi rembesan	
Ggb	Ggb1	Tidak terjadi rembesan	
	Ggb2	Tidak terjadi rembesan	
	Ggb3	Tidak terjadi rembesan	
Ggc	Ggc1	Tidak terjadi rembesan	
	Ggc2	Tidak terjadi rembesan	
	Ggc3	Tidak terjadi rembesan	

Variasi	Benda Uji	Rembesan	Dokumentasi
Ggd	Ggd1	Tidak terjadi rembesan	
	Ggd2	Tidak terjadi rembesan	
	Ggd3	Tidak terjadi rembesan	
Gge	Gge1	Tidak terjadi rembesan	
	Gge2	Tidak terjadi rembesan	
	Gge3	Tidak terjadi rembesan	

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi Gga (0%, +0%) sebagai genteng beton tanpa bahan campuran tidak memperlihatkan adanya rembesan maupun tetesan air pada permukaannya. Kondisi serupa juga dijumpai pada genteng beton variasi Ggb (7,5%, + 5%), Ggc (10%, + 5%), Ggd (7,5%, + 10%), dan Gge (10%, + 10%) di mana seluruh variasi tersebut tidak menunjukkan adanya tetesan air pada bagian bawah genteng.

Serbuk kaca yang digunakan sebagai substitusi sebagian pasir dapat mempertahankan kerapatan campuran genteng beton sehingga sifat kedap airnya tetap terjaga. Ukuran partikelnya yang halus mampu mengisi celah di antara butiran pasir sehingga volume rongga atau *void* menjadi lebih kecil. Serbuk kaca juga memiliki daya serap air yang sangat rendah, sehingga dapat membantu mengurangi potensi rembesan pada genteng beton. Sementara itu, silika yang terkandung dalam abu tempurung kelapa dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil proses hidrasi semen. Partikel abu yang halus juga memberikan efek *filler* dengan mengisi ruang kosong, sehingga struktur genteng beton menjadi lebih padat.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa seluruh genteng beton yang diuji telah memenuhi persyaratan SNI 0096:2007 dalam hal pengujian rembesan air.

4.2.6 Uji Penyerapan Air (Porositas)

Dilaksanakan dengan cara merendam genteng beton dalam kondisi kering ke dalam air hingga seluruh bagian genteng terendam sepenuhnya selama 24 jam. Tetapi

sebelumnya, genteng beton dikeringkan di dalam oven pada suhu 110°C. Adapun hasil pengujian penyerapan air tersebut disajikan dalam Tabel 4.19 berikut ini.

Tabel 4.19 Hasil Pengujian Penyerapan Air

Variasi	Benda Uji	Berat Kering (K) (Kg)	Berat Basah (W) (Kg)
Gga	Gga1	5,345	5,800
	Gga2	4,960	5,380
	Gga3	5,575	6,015
Ggb	Ggb1	4,930	5,360
	Ggb2	5,240	5,710
	Ggb3	5,325	5,655
Ggc	Ggc1	4,620	4,950
	Ggc2	5,315	5,745
	Ggc3	5,395	5,815
Ggd	Ggd1	5,280	5,625
	Ggd2	5,245	5,615
	Ggd3	5,590	6,015
Gge	Gge1	5,265	5,625
	Gge2	4,770	5,121
	Gge3	5,345	5,685

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Tabel 4.19 menampilkan ringkasan hasil pengukuran berat genteng beton pada kondisi kering dan setelah perendaman (basah). Data tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai penyerapan air genteng beton dengan mengacu pada persamaan yang telah ditetapkan sebagai berikut.

$$\frac{W - K}{K} \times 100\%$$

Dengan :

K = Berat genteng kering (kg)

W = Berat genteng basah (kg)

1. Variasi Gga

a. Gga1

Berat genteng kering (K) = 5,345 kg

Berat genteng basah (W) = 5,800 kg

$$Gga1 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Gga1 = \frac{5,800-5,345}{5,345} \times 100\%$$

$$Gga1 = \frac{0,455}{5,345} \times 100\%$$

$$Gga1 = 8,513\%$$

b. Gga2

Berat genteng kering (K) = 4,960 kg

Berat genteng basah (W) = 5,380 kg

$$Gga2 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Gga2 = \frac{5,380-4,960}{4,960} \times 100\%$$

$$Gga2 = \frac{0,420}{4,960} \times 100\%$$

$$Gga2 = 8,468\%$$

c. Gga3

Berat genteng kering (K) = 5,575 kg

Berat genteng basah (W) = 6,015 kg

$$Gga3 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Gga3 = \frac{6,015-5,575}{5,575} \times 100\%$$

$$Gga3 = \frac{0,440}{5,575} \times 100\%$$

$$Gga3 = 7,892\%$$

$$\text{Rata-rata penyerapan air} = \frac{Gga1+Gga2+Gga3}{3}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{8,513\%+8,468\%+7,892\%}{3}$$

$$\text{Rata-rata} = 8,291\%$$

2. Variasi Ggb

a. Ggb1

Berat genteng kering (K) = 4,930 kg

Berat genteng basah (W) = 5,360 kg

$$Ggb1 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Ggb1 = \frac{5,360-4,930}{4,930} \times 100\%$$

$$Ggb1 = \frac{0,430}{4,930} \times 100\%$$

$$Ggb1 = 8,722\%$$

b. Ggb2

Berat genteng kering (K) = 5,240 kg

Berat genteng basah (W) = 5,710 kg

$$Ggb2 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Ggb2 = \frac{5,710-5,240}{5,240} \times 100\%$$

$$Ggb2 = \frac{0,470}{5,240} \times 100\%$$

$$Ggb2 = 8,969\%$$

c. Ggb3

Berat genteng kering (K) = 5,325 kg

Berat genteng basah (W) = 5,655 kg

$$Ggb3 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Ggb3 = \frac{5,655-5,325}{5,325} \times 100\%$$

$$Ggb3 = \frac{0,330}{5,325} \times 100\%$$

$$Ggb3 = 6,197\%$$

$$\text{Rata-rata penyerapan air} = \frac{Ggb1+Ggb2+Ggb3}{3}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{8,722\%+8,969\%+6,197\%}{3}$$

$$\text{Rata-rata} = 7,963\%$$

3. Variasi Ggc

a. Ggc1

Berat genteng kering (K) = 4,620 kg

Berat genteng basah (W) = 4,950 kg

$$Ggc1 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Ggc1 = \frac{4,950-4,620}{4,620} \times 100\%$$

$$Ggc1 = \frac{0,330}{4,620} \times 100\%$$

$$Ggc1 = 7,143\%$$

b. Ggc2

Berat genteng kering (K) = 5,315 kg

Berat genteng basah (W) = 5,745 kg

$$Ggc2 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Ggc2 = \frac{5,745-5,315}{5,315} \times 100\%$$

$$Ggc2 = \frac{0,430}{5,315} \times 100\%$$

$$Ggc2 = 8,090\%$$

c. Ggc3

Berat genteng kering (K) = 5,395 kg

Berat genteng basah (W) = 5,815 kg

$$Ggc3 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Ggc3 = \frac{5,815-5,395}{5,395} \times 100\%$$

$$Ggc3 = \frac{0,420}{5,395} \times 100\%$$

$$Ggc3 = 7,785\%$$

$$\text{Rata-rata penyerapan air} = \frac{Ggc1+Ggc2+Ggc3}{3}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{7,143\%+8,090\%+7,785\%}{3}$$

$$\text{Rata-rata} = 7,673\%$$

4. Variasi Ggd

a. Ggd1

Berat genteng kering (K) = 5,280 kg

Berat genteng basah (W) = 5,625 kg

$$Ggd1 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Ggd1 = \frac{5,625-5,280}{5,280} \times 100\%$$

$$Ggd1 = \frac{0,345}{5,280} \times 100\%$$

$$Ggd1 = 6,534\%$$

b. Ggd2

$$\text{Berat genteng kering (K)} = 5,245 \text{ kg}$$

$$\text{Berat genteng basah (W)} = 5,615 \text{ kg}$$

$$Ggd2 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Ggd2 = \frac{5,615-5,245}{5,245} \times 100\%$$

$$Ggd2 = \frac{0,370}{5,245} \times 100\%$$

$$Ggd2 = 7,054\%$$

c. Ggd3

$$\text{Berat genteng kering (K)} = 5,590 \text{ kg}$$

$$\text{Berat genteng basah (W)} = 6,015 \text{ kg}$$

$$Ggd3 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Ggd3 = \frac{6,015-5,590}{5,590} \times 100\%$$

$$Ggd3 = \frac{0,425}{5,590} \times 100\%$$

$$Ggd3 = 7,603\%$$

$$\text{Rata-rata penyerapan air} = \frac{Ggd1+Ggd2+Ggd3}{3}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{6,534\%+7,054\%+7,603\%}{3}$$

$$\text{Rata-rata} = 7,064\%$$

5. Variasi Gge

a. Gge1

$$\text{Berat genteng kering (K)} = 5,265 \text{ kg}$$

$$\text{Berat genteng basah (W)} = 5,625 \text{ kg}$$

$$Gge1 = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$Gge1 = \frac{5,625-5,265}{5,265} \times 100\%$$

$$G_{ge1} = \frac{0,360}{5,265} \times 100\%$$

$$G_{ge1} = 6,838\%$$

b. G_{ge2}

$$\text{Berat genteng kering (K)} = 4,770 \text{ kg}$$

$$\text{Berat genteng basah (W)} = 5,115 \text{ kg}$$

$$G_{ge2} = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$G_{ge2} = \frac{5,115-4,770}{4,770} \times 100\%$$

$$G_{ge2} = \frac{0,345}{4,770} \times 100\%$$

$$G_{ge2} = 7,233\%$$

c. G_{ge3}

$$\text{Berat genteng kering (K)} = 5,345 \text{ kg}$$

$$\text{Berat genteng basah (W)} = 5,685 \text{ kg}$$

$$G_{ge3} = \frac{W-K}{K} \times 100\%$$

$$G_{ge3} = \frac{5,685-5,345}{5,345} \times 100\%$$

$$G_{ge3} = \frac{0,340}{5,345} \times 100\%$$

$$G_{ge3} = 6,361\%$$

$$\text{Rata-rata penyerapan air} = \frac{G_{ge1}+G_{ge2}+G_{ge3}}{3}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{6,838\%+7,233\%+6,361\%}{3}$$

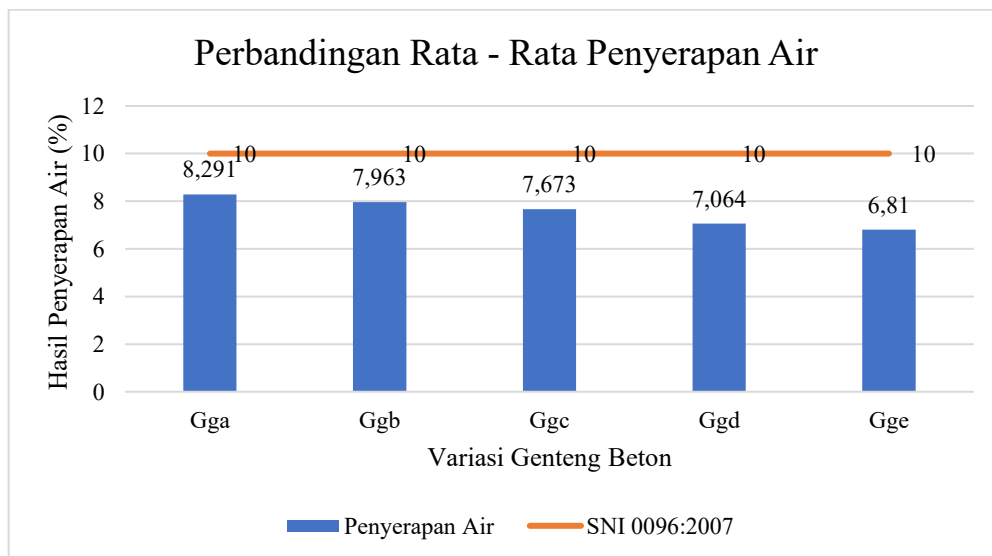
$$\text{Rata-rata} = 6,810\%$$

Tabel 4.20 Hasil Analisa Pengujian Penyerapan Air

Variasi	Benda Uji	Berat genteng kering (kg)	Berat genteng basah (kg)	Penyerapan Air (%)	Rata-Rata (%)	SNI 0096:2007 $\leq 10\%$
Gga	Gga1	5,345	5,800	8,513		Memenuhi
	Gga2	4,960	5,380	8,468	8,291	Memenuhi
	Gga3	5,575	6,015	7,892		Memenuhi

Variasi	Benda Uji	Berat genteng kering (kg)	Berat genteng basah (kg)	Penyerapan Air (%)	Rata-Rata (%)	SNI 0096:2007 $\leq 10\%$
Ggb	Ggb1	4,930	5,360	8,722	7,963	Memenuhi
	Ggb2	5,240	5,710	8,969		Memenuhi
	Ggb3	5,325	5,655	6,197		Memenuhi
Ggc	Ggc1	4,620	4,950	7,143	7,673	Memenuhi
	Ggc2	5,315	5,745	8,090		Memenuhi
	Ggc3	5,395	5,815	7,785		Memenuhi
Ggd	Ggd1	5,280	5,625	6,534	7,064	Memenuhi
	Ggd2	5,245	5,615	7,054		Memenuhi
	Ggd3	5,590	6,015	7,603		Memenuhi
Gge	Gge1	5,265	5,625	6,838	6,810	Memenuhi
	Gge2	4,770	5,121	7,233		Memenuhi
	Gge3	5,345	5,685	6,361		Memenuhi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Rata-Rata Penyerapan Air

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Rekapitulasi hasil pengujian pada Gambar 4.5 memperlihatkan bahwa seluruh variasi genteng beton memiliki nilai penyerapan air yang masih berada dalam rentang yang dipersyaratkan oleh SNI 0096:2007, dengan batas maksimum sebesar 10%. Nilai penyerapan air rata-rata berkisar antara 6,810% hingga 8,291%, di mana variasi Gga mencatat nilai tertinggi, sedangkan variasi Gge menunjukkan nilai terendah. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa seluruh variasi masih memenuhi persyaratan mutu berdasarkan standar yang berlaku.

Hasil pengujian penyerapan air menunjukkan bahwa variasi campuran genteng beton dengan substitusi serbuk kaca pada agregat halus dan abu tempurung kelapa pada semen memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan nilai penyerapan air. Serbuk kaca sebagai bahan substitusi pasir berperan dalam meningkatkan kepadatan kemasan partikel (*packing density*). Partikel halus serbuk kaca mengisi rongga antar butiran pasir sehingga jumlah *void* dalam campuran berkurang. Selain itu, serbuk kaca memiliki sifat tidak menyerap air yang dapat mengurangi nilai porositas genteng beton. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, bahwa semakin tinggi serbuk kaca yang digunakan dalam campuran genteng beton, maka semakin menurun tingkat rembesan air yang terjadi (Pratiwi et al., 2014).

Sementara itu, abu tempurung kelapa sebagai substitusi sebagian semen berkontribusi terhadap perubahan sifat pasta semen. Kandungan silika dalam abu tempurung kelapa bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen. Selain itu, efek *filler* dari partikel abu yang sangat halus juga membantu mengisi ruang kosong. Sama halnya yang terjadi pada penelitian terdahulu, bahwa abu tempurung kelapa menjadikan tingkat penyerapan air pada genteng beton yang jauh lebih rendah (J. D. Armando et al., 2021).

Berdasarkan hasil tersebut, variasi Gge menunjukkan kinerja terbaik dalam pengujian penyerapan air karena menghasilkan nilai paling rendah, yaitu 6,810%. Sementara itu, meskipun Gga memiliki penyerapan air paling tinggi, nilainya masih berada di bawah batas standar. Oleh karena itu, seluruh variasi dapat dinyatakan memenuhi persyaratan SNI 0096:2007.

4.3. Analisis Biaya Material

Analisis kebutuhan biaya menyajikan perhitungan biaya yang diperlukan dalam pembuatan genteng beton pada setiap variasi campuran penelitian. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui besarnya biaya penggunaan material penyusun, termasuk semen, pasir, limbah serbuk kaca, dan abu tempurung kelapa.

Berdasarkan kebutuhan bahan yang telah dihitung, selanjutnya dilakukan perhitungan total biaya produksi yang diperlukan untuk pembuatan satu buah benda uji atau genteng beton. Perhitungan biaya tersebut dilakukan dengan menjumlahkan seluruh kebutuhan material yang digunakan pada setiap variasi campuran dengan harga satuan masing-masing bahan. Rekapitulasi kebutuhan material terdapat pada tabel 4.21.

Tabel 4.21 Rekapitulasi Kebutuhan Material

Benda Uji	Perbandingan Bahan Campuran (gram)				Air (liter)
	Semen	ATK	Pasir	S. Kaca	
Gga	1806,53	0,00	4564,68	0,00	0,876
Ggb	1716,20	29,95	4222,33	325,31	0,846
Ggc	1716,20	29,95	4108,21	433,74	0,846
Ggd	1625,87	59,91	4222,33	325,31	0,817
Gge	1625,87	59,91	4108,21	433,74	0,817

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026

Kebutuhan material yang dihitung per 1 m² dengan dimensi 1 genteng beton 30 x 40 cm adalah 1.200 cm². Kebutuhan untuk per 1 m² adalah $\frac{10.000}{1.200} = 8,33$ buah/ m².

Tabel 4.22 Harga Satuan Biaya

No	Material	Satuan		Harga Satuan (Rp.)			Harga yang Digunakan (Rp.)
1.	Pasir	1	Kg	383,00	316,00	350,00	350,00
2.	Semen	1	Kg	1.450,00	1.437,00	1.375,00	1.437,00
3.	Serbuk Kaca	1	Kg	200,00	100,00	400,00	200,00
4.	Abu Tempurung Kelapa	1	Kg		1.400,00		1.400,00
5.	Air	1	Liter		6,00		6,00

Sumber: Hasil Analisis Peneliti, 2026

1. Genteng Beton Gga

Dengan perbandingan semen dan pasir sebesar 1:3 serta faktor air semen (fas) 0,485. Tanpa substitusi serbuk kaca dan abu tempurung kelapa.

Tabel 4.23 Biaya Produksi Genteng Variasi Gga

Material	Kebutuhan Bahan	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Harga Total (Rp)
Pasir	4,564	Kg	350,00	1.597,40
Semen	1,806	Kg	1.437,00	2.595,22
Air	0,876	Liter	6,00	5,26
Jumlah Biaya 1 Buah				4.197,88
Jumlah Biaya 1 m²				34.968,32

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026

2. Genteng Beton Ggb

Dengan perbandingan 0,95 semen : 0,05 abu tempurung kelapa : 2,775 pasir : 0,225 serbuk kaca serta faktor air semen (fas) 0,485.

Tabel 4.24 Biaya Produksi Genteng Variasi Ggb

Material	Kebutuhan Bahan	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Harga Total (Rp)
Pasir	4,222	Kg	350,00	1.447,70
Semen	1,716	Kg	1.437,00	2.465,89
Serbuk Kaca	0,325	Kg	200,00	65,00
Abu Tempurung Kelapa	0,02995	Kg	1.400,00	41,93
Air	0,876	Liter	6,00	5,08
Jumlah Biaya 1 Buah				4.055,60
Jumlah Biaya 1 m²				33.783,13

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026

3. Genteng Beton Ggc

Dengan perbandingan 0,95 semen : 0,05 ATK : 2,7 pasir : 0,3 serbuk kaca serta faktor air semen (fas) 0,485.

Tabel 4.25 Biaya Produksi Genteng Variasi Ggc

Material	Kebutuhan Bahan	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Harga Total (Rp)
Pasir	4,108	Kg	350,00	1.437,80
Semen	1,716	Kg	1.437,00	2.465,89
Serbuk Kaca	0,433	Kg	200,00	86,60
Abu Tempurung Kelapa	0,02995	Kg	1.400,00	41,93
Air	0,876	Liter	6,00	5,08
Jumlah Biaya 1 Buah				4.037,30
Jumlah Biaya 1 m²				33.630,69

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026

4. Genteng Beton Ggd

Dengan perbandingan 0,9 semen : 0,1 ATK : 2,775 pasir : 0,225 serbuk kaca serta faktor air semen (fas) 0,485.

Tabel 4.26 Biaya Produksi Genteng Variasi Ggd

Material	Kebutuhan Bahan	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Harga Total (Rp)
Pasir	4,222	Kg	350,00	1.477,70
Semen	1,625	Kg	1.437,00	2.335,13
Serbuk Kaca	0,325	Kg	200,00	65,00
Abu Tempurung Kelapa	0,05991	Kg	1.400,00	83,87
Air	0,817	Liter	6,00	4,90
Jumlah Biaya 1 Buah				3.966,60
Jumlah Biaya 1 m²				33.041,79

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026

5. Genteng Beton Gge

Dengan perbandingan 0,9 semen : 0,1 ATK : 2,7 pasir : 0,3 serbuk kaca serta faktor air semen (fas) 0,485.

Tabel 4.27 Biaya Produksi Genteng Variasi Gge

Material	Kebutuhan Bahan	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Harga Total (Rp)
Pasir	4,810	Kg	350,00	1.437,80
Semen	1,625	Kg	1.437,00	2.335,13
Serbuk Kaca	0,433	Kg	200,00	86,60
Abu Tempurung Kelapa	0,05991	Kg	1.400,00	83,87
Air	0,817	Liter	6,00	4,90
Jumlah Biaya 1 Buah				3.948,30
Jumlah Biaya 1 m²				32.889,35

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026

Berdasarkan hasil perhitungan biaya produksi yang telah dilakukan, selanjutnya disusun rekapitulasi total biaya pada setiap variasi campuran genteng beton. Rekapitulasi tersebut bertujuan untuk mempermudah perbandingan biaya produksi secara keseluruhan dari masing-masing variasi yang digunakan dalam penelitian. Adapun rekapitulasi biaya produksi disajikan pada **Tabel 4.27** berikut.

Tabel 4.28 Rekapitulasi Jumlah Biaya Produksi Per Benda Uji

Variasi	Jumlah Biaya Produksi (Rp.)
Gga	4.197,88
Ggb	4.055,60
Ggc	4.037,30
Ggd	3.966,60
Gge	3.948,30

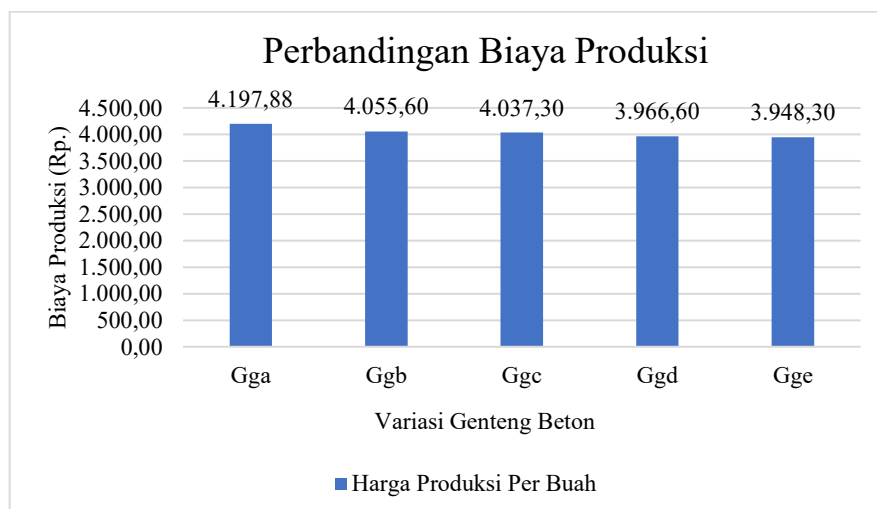
Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026

Tabel 4.29 Rekapitulasi Jumlah Biaya Produksi Per m²

Variasi	Jumlah Biaya Produksi (Rp.)
Gga	34.968,32
Ggb	33.783,13
Ggc	33.630,69
Ggd	33.041,79
Gge	32.889,35

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026

Merujuk pada Tabel 4.29 dan Tabel 4.30, hasil analisis menunjukkan bahwa biaya produksi genteng beton untuk setiap variasi campuran memiliki nilai yang relatif berbeda, baik pada skala per benda uji maupun per meter persegi. Biaya produksi per benda uji berada pada kisaran Rp3.948,30 hingga Rp4.197,88, sedangkan biaya produksi per m² berkisar antara Rp32.889,35 hingga Rp34.968,32. Oleh karena itu, dalam perhitungan analisis biaya material pada inovasi ini digunakan harga dasar sebagai acuan utama karena menghasilkan estimasi biaya yang paling hemat secara ekonomis. Perbandingan biaya produksi disajikan dalam Gambar 4.6.

**Gambar 4.6** Grafik Perbandingan Biaya Produksi

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Perbedaan biaya ini dipengaruhi oleh komposisi material pada setiap variasi campuran yang menggunakan substitusi serbuk kaca dan abu tempurung kelapa

dalam proporsi berbeda. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi tidak hanya memengaruhi sifat mekanik genteng, tetapi juga memberikan dampak terhadap efisiensi biaya produksi.

4.4. Analisis Hubungan Antara Beban Lentur, Penyerapan Air, dan Biaya Material Pada Inovasi Genteng Beton

Berdasarkan hasil pengujian beban lentur, penyerapan air, dan analisis biaya material dalam inovasi genteng beton dengan substitusi serbuk kaca dan abu tempurung kelapa, dapat dilihat melalui tabel rekapitulasi berikut:

Tabel 4.30 Rekapitulasi Hasil Pengujian

Variasi Genteng	Pengujian		
	Beban Lentur (N)	Penyerapan Air (%)	Analisis Biaya Material (Rp.)
Gga	1416,21	8,291	4.197,88
Ggb	1452,88	7,963	4.055,60
Ggc	1630,92	7,673	4.037,30
Ggd	1609,58	7,064	3.966,60
Gge	1731,52	6,810	3.948,30

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026

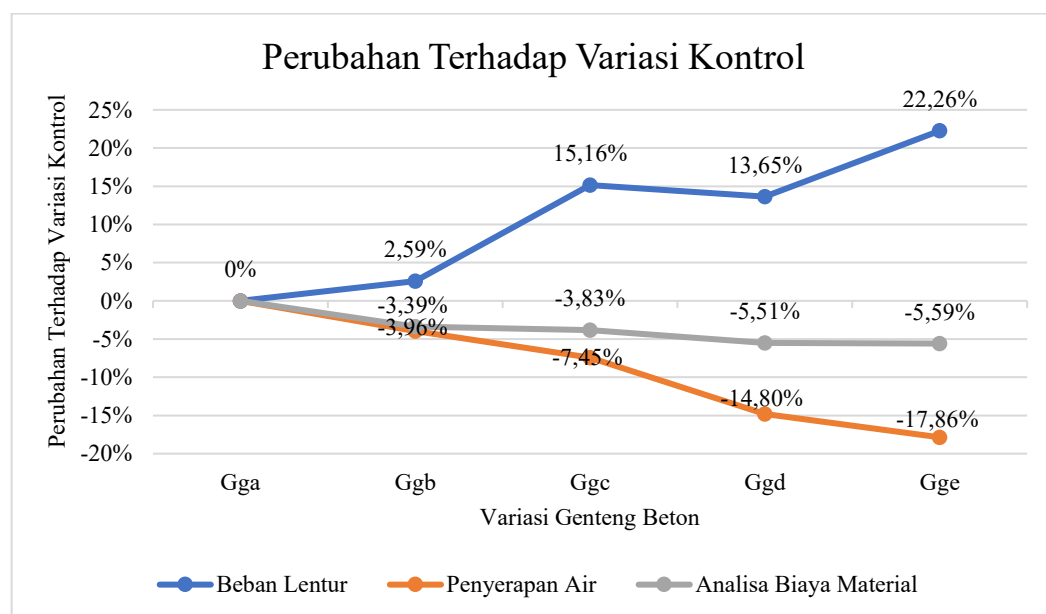
Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa setiap variasi genteng beton menunjukkan adanya pengaruh yang berbeda terhadap nilai beban lentur, penyerapan air, serta biaya material pada setiap komposisi. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa penambahan substitusi serbuk kaca dan abu tempurung kelapa memberikan perubahan terhadap karakteristik mekanik genteng, terutama dalam meningkatkan beban lentur dan menurunkan tingkat penyerapan air pada variasi tertentu. Analisis dilakukan dengan membandingkan setiap variasi terhadap kecenderungan perubahan nilai masing-masing parameter untuk mengetahui hubungan antara komposisi material dan performa teknis genteng beton. Melalui pendekatan tersebut, dapat diidentifikasi variasi dengan kinerja paling optimal berdasarkan keseimbangan antara kekuatan, daya serap air, dan efisiensi material.

Hasil rekapitulasi persentase perubahan terhadap variasi kontrol disajikan pada Tabel 4.32.

Tabel 4.31 Rekapitulasi Persentase Perubahan Terhadap Variasi Kontrol

Variasi Genteng	Pengujian		
	Beban Lentur (%)	Penyerapan Air (%)	Analisa Biaya Material (%)
Gga	0,00	0,00	0,00
Ggb	2,59	-3,96	-3,39
Ggc	15,16	-7,45	-3,83
Ggd	13,65	-14,80	-5,51
Gge	22,26	-17,86	-5,59

Sumber: Hasil Analisis Perhitungan, 2026



Gambar 4.7 Grafik Persentase Perubahan Terhadap Variasi Kontrol

Sumber: Hasil Analisis Pengujian, 2026

Mengacu pada rekapitulasi hasil pengujian, penggunaan limbah serbuk kaca sebagai bahan substitusi agregat halus, dan abu tempurung kelapa sebagai bahan substitusi semen pada pembuatan genteng beton menunjukkan adanya keterkaitan antara parameter-parameter yang diuji. Beban lentur yang dihasilkan berada di

angka 1416,21 N sampai dengan 1731,52 N. Penyerapan air terus mengalami penurunan seiring penambahan persentase bahan substitusi.

Genteng beton inovasi pada penelitian ini menunjukkan peningkatan karakteristik mutu berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan serbuk kaca sebagai substitusi agregat halus serta abu tempurung kelapa sebagai bahan substitusi semen mampu memperbaiki struktur internal material menjadi lebih rapat dan kompak. Kondisi tersebut berdampak pada peningkatan kinerja genteng beton, baik dari aspek beban lentur maupun ketahanan terhadap penyerapan air.

Dari segi biaya, perubahan yang terjadi relatif kecil namun cenderung negatif. Hal ini menunjukkan adanya penurunan biaya produksi pada beberapa variasi dibandingkan variasi kontrol. Penurunan paling signifikan terlihat pada Ggd dan Gge, yang menandakan efisiensi biaya lebih baik.

Secara keseluruhan, keterkaitan antar parameter menunjukkan bahwa penggunaan serbuk kaca sebagai substitusi agregat halus serta abu tempurung kelapa sebagai bahan substitusi semen, memberikan pengaruh yang positif terhadap karakteristik genteng beton. Hasil pengujian memperlihatkan adanya peningkatan beban lentur, penurunan daya serap air, yang mengindikasikan peningkatan kerapatan struktur material. Dengan demikian, genteng beton inovasi berbasis limbah ini memiliki potensi sebagai alternatif material bangunan yang lebih ramah lingkungan, dengan komposisi campuran tertentu yang tetap mampu memenuhi standar mutu SNI 0096:2007 yang disyaratkan untuk aplikasi konstruksi.

Berdasarkan penelitian ini yang telah dilakukan, setiap variasi menunjukkan keunggulan pada aspek tertentu sehingga tidak ada satu variasi pun yang unggul di semua kategori secara bersamaan. Variasi Gge (10%, +10%) mencatat beban lentur tertinggi sebesar 1731,52 N sekaligus penyerapan air terendah di angka 6,810%, menjadikannya yang paling optimal dari sisi performa mekanis. Biaya produksi genteng Gge lebih efisien dibanding sebagian besar variasi lainnya, sehingga menjadi komposisi paling optimal dalam penelitian ini.