

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Hasil Pengujian Material

Pengujian material adalah langkah pertama yang dilakukan sebelum memulai proses pembuatan benda uji. Langkah ini dilakukan untuk mengidentifikasi terkait kualitas material yang digunakan pada penelitian.

4.1.1 Pengujian Agregat Halus

Pengujian berat jenis dan kandungan kadar lumpur pada agregat halus dilakukan sesuai standar SNI 03-6820-2002.

1. Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis agregat halus dilakukan untuk menentukan nilai berat jenis yang berfungsi sebagai faktor pembagi dalam mengkonversi satuan berat pasir menjadi satuan volume padat. Sesuai dengan SNI 1970:2016, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis sebagai faktor pembagi untuk mengubah satuan berat pasir menjadi satuan volume padat. Berikut hasil pengujian berat jenis agregat halus.

Tabel 4. 1 Pengujian Berat Jenis

Pengujian	Sampel (gr)
Berat benda uji kondisi jenis kering permukaan (S)	500
Berat benda uji kering oven (A)	492,8
Berat piknometer diisi air 25°C (B)	658,4
Berat piknometer + pasir + air (C)	972,6

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan perhitungan rumus (4) diketahui bahwa hasil pengujian berat jenis agregat halus berada pada angka 2,65 gr/cm². Nilai tersebut berada dalam rentang yang disyaratkan pada SNI 1970:2016. Dengan demikian, pasir yang digunakan telah memenuhi ketentuan serta dapat digunakan sebagai bahan campuran.

2. Pengujian Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur bertujuan untuk mengukur persentase kandungan lumpur dalam agregat halus. SNI 03-6820-2002 menjelaskan bahwa agregat halus seharusnya tidak mengandung lumpur dan tanah liat lebih dari 1%. Kandungan lumpur yang berlebih dapat menurunkan daya ikat semen dan pasir yang juga menurunkan mutu rencana. Berikut hasil pengujian kadar lumpur dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Pengujian Kadar Lumpur

Kondisi	Ketinggian (ml)
Agregat halus + lumpur	171
Agregat halus	170
Lumpur	1

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan perhitungan rumus (5), kadar lumpur yang terdapat pada agregat halus sebesar 0,58%. Kadar tersebut masih berada pada batas toleransi yang diizinkan berdasarkan SNI SNI 03-6820-2002 yang menyatakan bahwa kandungan lumpur pada agregat halus tidak boleh mengandung lebih dari 1%. Dengan demikian agregat halus dapat digunakan sebagai bahan campuran pada mortar GRC.

4.1.2 Pengujian Waktu Ikat Semen

Pengujian waktu ikat semen dilakukan untuk mengetahui pengaruh substitusi *fly ash* terhadap waktu pengikatan pasta semen. Pengujian mengacu pada SNI 03-6827-2002 menggunakan alat Vicat dengan tiga variasi campuran, yaitu semen kontrol (0% *fly ash*), substitusi *fly ash* 5%, dan substitusi *fly ash* 10%. Pengamatan dilakukan setiap 15 menit dengan mencatat kedalaman penetrasi jarum Vicat hingga mencapai kriteria waktu ikat awal.

Tabel 4.3 Pengujian Waktu Ikat Semen Kontrol

No	Waktu Penurunan (Menit)	Penurunan Jarum (mm)
1.	15	49
2.	30	49
3.	45	45
4.	60	37

No	Waktu Penurunan (Menit)	Penurunan Jarum (mm)
5.	75	16

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.3, pasta semen tanpa substitusi *fly ash* menunjukkan penurunan penetrasi jarum secara bertahap dari 49 mm pada menit ke-15 menjadi 16 mm pada menit ke-75. Berdasarkan interpolasi linier antara pengukuran menit ke-60 (37 mm) dan menit ke-75 (16 mm), penetrasi 25 mm diperkirakan tercapai pada 68,6 menit, sehingga waktu ikat awal semen kontrol adalah sekitar 68,6 menit.

Tabel 4.4 Pengujian Waktu Ikut Semen 5% *Fly ash*

No	Waktu Penurunan (Menit)	Penurunan Jarum (mm)
1.	15	48
2.	30	46
3.	45	43
4.	60	35
5.	75	13

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Pada campuran dengan substitusi 5% *fly ash* (Tabel 4.4), penetrasi jarum berkurang dari 48 mm pada menit ke-15 menjadi 13 mm pada menit ke-75. Berdasarkan interpolasi antara menit ke-60 (35 mm) dan menit ke-75 (13 mm), penetrasi 25 mm diperkirakan terjadi pada 66,8 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* sebesar 5% menghasilkan waktu ikat awal yang sedikit lebih cepat dibandingkan campuran kontrol.

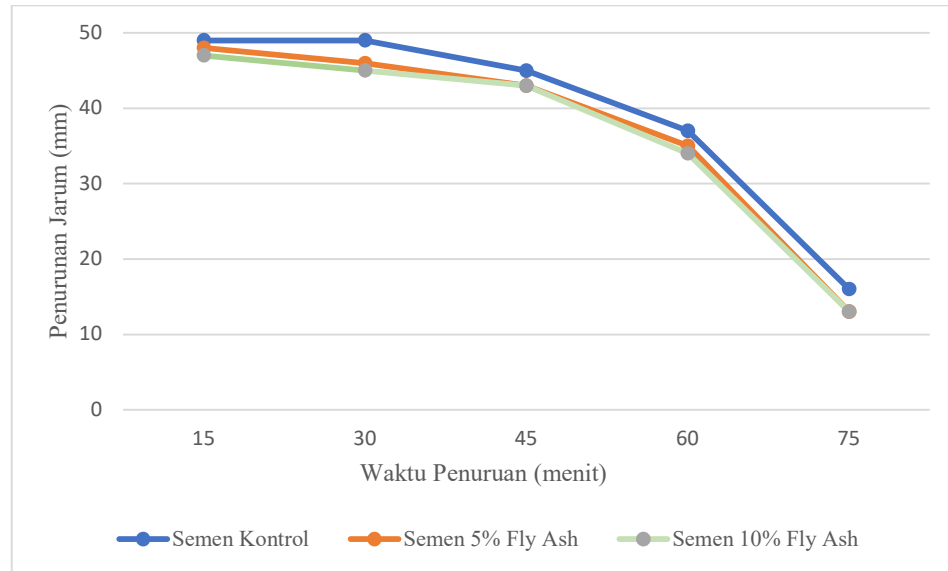
Tabel 4.5 Pengujian Waktu Ikut Semen 10% *Fly ash*

No	Waktu Penurunan (Menit)	Penurunan Jarum (mm)
1.	15	47
2.	30	45
3.	45	43
4.	60	34
5.	75	13

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Sementara itu, pada campuran dengan substitusi 10% *fly ash* (Tabel 4.5), penetrasi jarum menurun dari 47 mm pada menit ke-15 menjadi 13 mm pada menit ke-75. Berdasarkan interpolasi antara menit ke-60 (34 mm) dan menit ke-

75 (13 mm), penetrasi 25 mm diperkirakan dicapai pada 66,4 menit. Waktu ikat awal ini juga sedikit lebih cepat dibandingkan semen kontrol.



Gambar 4.1 Grafik Hasil Pengujian Waktu Ikut Semen

Berdasarkan hasil pengujian waktu ikat semen, variasi semen normal memiliki waktu pengikatan paling lama (lambat). Sebaliknya, variasi dengan substitusi 10% *fly ash* memiliki waktu pengikatan yang paling cepat, sementara variasi substitusi 5% *fly ash* memiliki waktu ikat yang berada di antaranya. Hal ini sejalan pada penelitian (Bagus Jaelani & Adji Putra. 2024) *Fly ash* berperan sebagai bahan pozzolan, yang berarti ia bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), suatu produk sampingan dari hidrasi semen, untuk menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang memperkuat beton. Pada waktu pengikatan awal, *fly ash* memberikan waktu tambahan untuk penyesuaian dan penempatan beton sebelum mulai mengeras. Penelitian tersebut juga menjelaskan pada pengujiannya yaitu *Fly ash* memperlambat proses hidrasi semen, yang secara alami menyebabkan perpanjangan waktu ikat beton, baik pada tahap awal (*initial setting time*) maupun tahap akhir (*final setting time*).

4.1.3 Pengujian Berat Jenis Fly Ash

Pengujian berat jenis fly ash dilakukan bertujuan untuk menentukan volume absolut material secara akurat di dalam volume total adukan. Ketepatan nilai tersebut memastikan perhitungan jobmix design tidak mengalami kekurangan atau kelebihan volume, sehingga campuran mortar GRC yang dihasilkan memiliki homogenitas dan stabilitas mutu yang tepat sesuai rencana. Mengacu pada ASTM C188 berikut hasil pengujian berat jenis fly ash.

Tabel 4. 6 Pengujian Berat Jenis Fly Ash

Pengujian	Notasi	Sampel (gr)
Berat <i>fly ash</i>	W1	50
Berat piknometer + cairan	W2	362
Berat piknometer + <i>fly ash</i> + cairan	W3	392

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan perhitungan rumus (7) diketahui bahwa hasil pengujian berat jenis agregat halus berada pada angka 2,50 gr/cm². Nilai tersebut berada dalam rentang yang disyaratkan pada ASTM C188. Dengan demikian, fly ash yang digunakan telah memenuhi ketentuan serta dapat digunakan sebagai bahan campuran.

4.2 Analisa Hasil Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kekuatan lentur mortar dilaksanakan setelah benda uji berumur 28 hari, menggunakan alat UTM di Laboratorium Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro dengan metode *Four-Point Bending* yang merujuk pada standar ASTM C947. Pengujian kuat lentur dilakukan menggunakan tiga benda uji balok berukuran 500 x 50 x 15 mm pada setiap variasinya. Hasil pengujian ini akan mendapatkan nilai MOR yaitu beban maksimal ditahan sebelum benda uji benar – benar patah. Pengujian kuat lentur dapat dihitung menggunakan rumus (1). Sebagai contoh, perhitungan kuat lentur untuk variasi A0_FA0FG1 dapat dilihat di bawah ini:

$$\text{Variasi A0_FA0FG1 (1)} = 0,15 \text{ kN} = \frac{150 \times 450}{50 \times (15)^2} = 6 \text{ Mpa}$$

$$\text{Variasi A0_FA0FG1 (2)} = 0,16 \text{ kN} = \frac{160 \times 450}{50 \times (15)^2} = 6,4 \text{ Mpa}$$

$$\text{Variasi A0_FA0FG1 (3)} = 0,15 \text{ kN} = \frac{155 \times 450}{50 \times (15)^2} = 6,2 \text{ Mpa}$$

Rata-rata kuat lentur variasi A0_FA0FG1 = 6,2 Mpa

Perhitungan detail untuk variasi inovasi GRC lainnya dilakukan dengan metode perhitungan yang sama dan disajikan secara lengkap pada lampiran 10. Data hasil pengujian kekuatan lentur untuk semua variasi disajikan pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.7 Hasil Uji Kuat Lentur Nilai Kuat Lentur

Variasi	Sampel	Hasil Pengujian		
		Beban Puncak (kN)	Nilai Kuat Lentur (MPa)	Rata – rata (MPa)
A0_FA0FG1	1	0,15	6,00	6,20
	2	0,16	6,40	
	3	0,16	6,20	
A1_FA5FG1	1	0,4	16,00	17,40
	2	0,47	18,80	
	3	0,44	17,40	
A2_FA10FG1	1	0,54	21,60	21,80
	2	0,55	22,00	
	3	0,55	21,80	
A3_FA5FG2	1	0,54	21,60	20,60
	2	0,49	19,60	
	3	0,52	20,60	
A4_FA10FG2	1	0,6	24,00	24,60
	2	0,63	25,20	
	3	0,62	24,60	

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

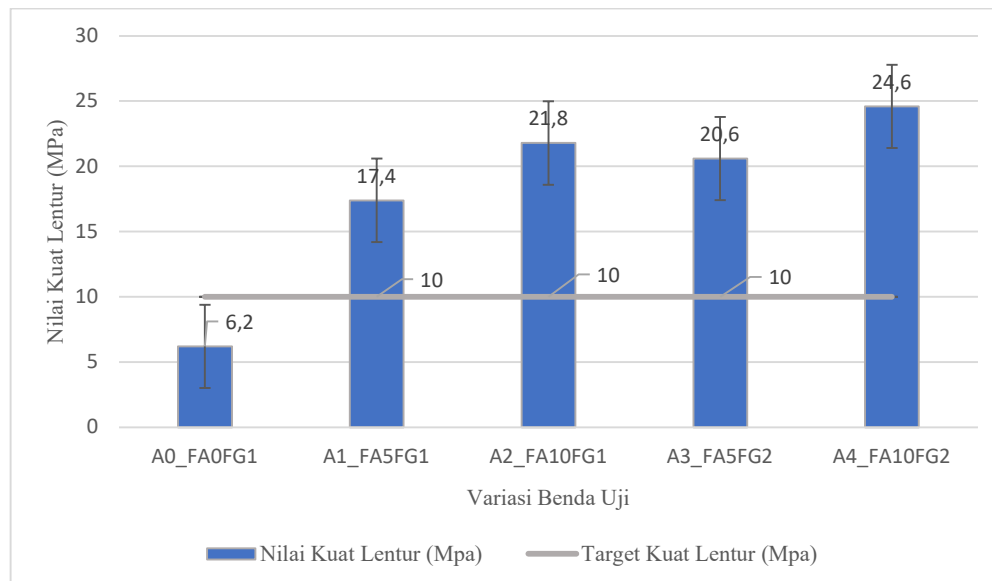
Secara keseluruhan hasil pengujian kuat lentur mortar GRC dapat dilihat pada tabel 4.8 berikut :

Tabel 4.8 Rekapitulasi Hasil Uji Kuat Lentur Rata - Rata

Variasi	Target nilai Kuat Lentur (MPa)	Nilai Kuat Lentur (MPa)
A0_FA0FG1	10	6,20
A1_FA5FG1	10	17,40
A2_FA10FG1	10	21,80
A3_FA5FG2	10	20,60
A4_FA10FG2	10	24,60

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Gambar 4.2 menunjukkan grafik perbandingan hasil dari pengujian kuat lentur yang didapatkan dari mortar GRC terhadap nilai minum kuat lentur oada ASTM C947.



Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji Kuat Lentur

Berdasarkan Gambar 4.2, menjelaskan hubungan antara variasi presentase substitusi *fly ash* dan penambahan *fiberglass* terhadap nilai rata rata kuat lentur GRC pada umur 28 hari. Seperti yang terlihat pada grafik tersebut, penambahan variasi presentase *fly ash* menunjukkan dua tren utama. Tren pertama adalah pengaruh positif substitusi *fly ash*. Pada kelompok kadar serat yang sama, peningkatan persentase *fly ash* dari 0% hingga 10% terbukti meningkatkan kuat lentur secara linier. Hal ini terlihat pada kelompok serat 1% A0_FA0FG1 ke A1_FA5FG1 dan A2_FA10FG1 serta kelompok serat 2% A3_FA5FG2 ke A4_FA10FG2. Penelitian yang dilakukan oleh Lisa et al. (2024) membuktikan bahwa *fly ash* dapat meningkatkan nilai kuat lentur GRC. Hal ini disebabkan oleh senyawa silika dan alumina yang terdapat dalam *fly ash*, yang dapat mempercepat proses hidrasi dan berdampak positif pada kekuatan campuran GRC. Pada penelitian (Anni et al., 202) menjelaskan kandungan silika dan alumina hingga mencapai 80% pada *fly ash* memberikan reaksi pozzolanik yang mengisi rongga mikro secara sempurna (*pore-filling effect*) sehingga meningkatkan kuat lekat (*interlocking*).

Tren kedua adalah pengaruh peningkatan kadar serat *fiberglass*. Ketika membandingkan variasi dengan persentase *fly ash* yang setara, penambahan kadar serat dari 1% menjadi 2% terbukti meningkatkan kuat lentur seperti pada

perbandingan A1_FA5FG1 terhadap A3_FA5FG2, serta A2_FA10FG1 terhadap A4_FA10FG2. Penelitian yang dilakukan oleh Prof. Manish Tiwari et al. (2018), bahwa kuat lentur meningkat seiring bertambahnya serat kaca. Hal ini mengonfirmasi peran serat sebagai penahan retak (*crack arrester*) yang menahan rambatan retak saat panel menerima beban lentur (*bridging effect*). Adapun sedikit penurunan nilai dari A2_FA10FG1 sebesar 21,8 MPa ke A3_FA5FG2 sebesar 20,6 MPa disebabkan oleh penurunan kadar *fly ash* dari 10% menjadi 5%. Fenomena ini menunjukkan bahwa kekuatan lentur GRC tidak hanya bertumpu pada jumlah serat, melainkan sangat bergantung pada kepadatan matriks pengikat di sekitarnya yang dioptimalkan oleh keberadaan *fly ash*.

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilaksanakan dalam penelitian ini, dapat memperlihatkan penggunaan *fly ash* sebagai bahan substitusi dan *fiberglass* sebagai bahan tambah dapat meningkatkan kuat lentur pada campuran mortar GRC. Namun peningkatan kuat lentur ini dipengaruhi oleh presentase komposisi campuran yang digunakan untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Peningkatan kuat lentur pada penelitian ini juga berada diatas batas minimum kuat lentur rencana yaitu sebesar 10 MPa sesuai dengan standar GRCA dan SNI 8299-2017. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa mortar GRC yang dihasilkan telah memenuhi standar yang ditetapkan dan memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi.

Dalam mengaplikasikan nilai kuat lentur hasil laboratorium pada elemen *prototype* yang memiliki perbedaan ketebalan sebesar 5 mm, nilai MOR yang diperoleh dari spesimen uji laboratorium tetap berlaku mutlak sebagai indikator kekuatan material *prototype*. Hal ini sejalan dengan pedoman GRCA *Specification for GRC* yang menyatakan bahwa nilai sifat mekanis yang didapatkan dari benda uji laboratorium pada skala tipis digunakan secara langsung sebagai acuan kapasitas kuat lentur desain untuk elemen *prototype* atau komponen struktur berskala penuh, selama proporsi campuran dan metode perawatan (*curing*) yang digunakan seragam.

4.3 Analisa Hasil Pengujian Daya Serap Air

Pengujian daya serap air dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan material dalam menyerap air serta mengukur tingkat rongga yang ada di dalam mortar GRC. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan benda uji kubus berukuran 50 x 50 x 50 mm sebanyak dua benda uji pada setiap variasi. Pengujian kuat lentur mengacu pada standar ASTM C642. Terdapat dua jenis nilai daya serap air yang dapat dihitung yaitu nilai absorpsi. Adapun pengujian daya serap absorpsi didapatkan sebagai berikut.

4.3.1. Pengujian Daya Serap Air

Pengujian daya serap air bertujuan untuk menilai jumlah air yang dapat diserap oleh pori-pori mortar GRC. Hasil pengujian kemampuan menyerap air diperoleh dari nilai rendam dan rebus. Pengujian kemampuan serap ini dapat dihitung menggunakan rumus (2), sebagai contoh perhitungan daya serap air variasi A0_FA0FG1 dapat dilihat dibawah ini:

$$\text{Variasi A0_FA0FG1 (1)} = \frac{291,1 - 268}{268} \times 100 = 8,62\%$$

$$\text{Variasi A0_FA0FG1 (2)} = \frac{290,4 - 268}{268} \times 100 = 8,36\%$$

$$\text{Rata-rata daya serap air variasi A0_FA0FG1} = 8,49\%$$

Perhitungan detail untuk variasi inovasi GRC lainnya dilakukan dengan metode perhitungan yang sama dan disajikan secara lengkap pada lampiran 11. Data hasil pengujian daya serap air untuk semua variasi disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 4.9 Hasil Uji Daya Serap Air

Variasi	Sampel	Massa Kering Oven (A) (gr)	Massa Jenuh Rebus (C) (gr)	Daya Serap Air (%)	Rata – rata (%)
A0_FA0FG1	1	268	291,1	8,62	8,49
	2	268	290,4	8,36	
A1_FA5FG1	1	267,4	292,1	9,24	9,22
	2	268,3	293	9,21	
A2_FA10FG1	1	268,7	294,8	9,71	9,49
	2	270	295	9,26	

Variasi	Sampel	Massa Kering Oven (A) (gr)	Massa Jenuh Rebus (C) (gr)	Daya Serap Air (%)	Rata – rata (%)
A3_FA5FG2	1	267,7	290	8,33	8,42
	2	270	293	8,52	
A4_FA10FG2	1	282,7	308	8,95	8,91
	2	277,1	301,7	8,88	

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Secara keseluruhan hasil pengujian daya serap air mortar GRC ini dapat dilihat pada tabel 4.10.

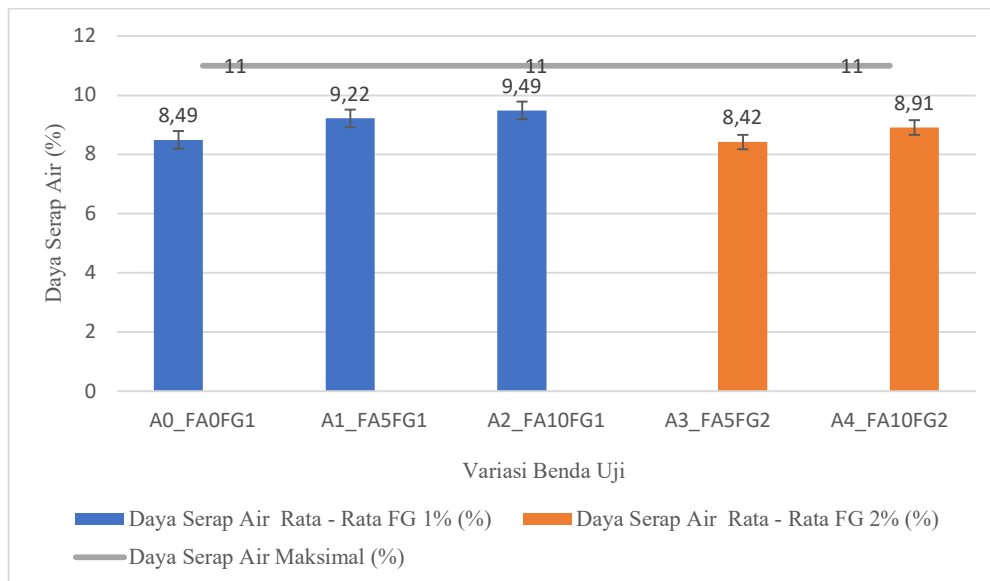
Tabel 4.10 Rekapitulasi Hasil Uji Daya Serap Air Rata - Rata

Variasi	Nilai Maksimum Daya Serap Air (%)	Rata – Rata Hasil Uji Daya Serap Air (%)
A0_FA0FG1	11	8,49
A1_FA5FG1	11	9,22
A2_FA10FG1	11	9,49
A3_FA5FG2	11	8,42
A4_FA10FG2	11	8,91

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Tabel 4.10 menunjukkan bahwa perubahan komposisi *fly ash* dan *fiberglass* memberikan pengaruh yang berbeda terhadap nilai daya serap air mortar GRC. Pada kelompok variasi dengan kandungan *fiberglass* tetap sebesar 1% (A0_FA0FG1, A1_FA5FG1, dan A2_FA10FG1), peningkatan persentase *fly ash* dari 0% menjadi 10% diikuti dengan meningkatnya nilai daya serap air. Pola serupa juga terlihat pada kelompok variasi dengan *fiberglass* 2%, di mana penambahan *fly ash* dari 5% menjadi 10% menyebabkan nilai daya serap air mengalami peningkatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase substitusi *fly ash* yang digunakan, semakin besar kecenderungan mortar GRC menyerap air.

Berikut merupakan gambar grafik perbandingan hasil dari pengujian daya serap air yang dihasilkan dari mortar GRC terhadap batas nilai maksimum absorpsi dan proositas sesuai dengan standar ASTM C642.



Gambar 4.3 Grafik Hasil Uji Daya Serap

Gambar 4.3 menjelaskan hubungan antara variasi presentase substitusi *fly ash* dan penambahan *fiberglass* terhadap nilai rata rata daya serap air GRC pada umur 28 hari. Seperti yang terlihat pada grafik tersebut, penambahan variasi presentase *fly ash* cenderung memberikan tren peningkatan pada daya serap air. Sebaliknya, penambahan variasi presentase *fiberglass* dari 1% menjadi 2% menunjukkan tren penurunan nilai daya serap air secara konsisten.

Pada variasi kandungan *fiberglass* sebesar 1% yaitu variasi A0_FA0FG1; A1_FA5FG1; A2_FA10FG1, peningkatan kadar *fly ash* dari 0% ke 10% secara konsisten menaikkan nilai rata – rata daya serap air dari 8,49% hingga 9,49%. Tren kenaikan yang serupa juga terdapat pada variasi *fiberglass* 2%, di mana penambahan *fly ash* 5% pada A3_FA5FG2 ke 10% pada A4_FA10FG2 meningkatkan nilai daya serap dari 8,42% menjadi 8,91%. Disisi lain pada gambar 4.2 juga memperlihatkan tren penurunan daya serap air yang signifikan akibat pengaruh penambahan presentase *fiberglass*. Ketika kadar *fiberglass* ditingkankan 1% menjadi 2%, nilai daya serap air mengalami penurunan yang konsisten. Seperti pada variasi A1_FA5FG1 dan A3_FA5FG2 dengan presentase *fly ash* yang sama yaitu 5%, pada A3_FA5FG2 memiliki nilai daya serap air lebih rendah sebesar

8,42% dibandingkan dengan variasi *fiberglass* 1% atau pada variasi A1_FA5FG1 sebesar 9,22%.

Peningkatan daya serap air yang terjadi akibat substitusi *fly ash* disebabkan oleh kandungan silika yang tinggi dalam *fly ash* dibandingkan dengan semen, yang mengakibatkan daya serap yang lebih besar. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Hana A dan Alimin M, 2024). Peningkatan daya serap air akibat *fly ash* juga diduga terjadi karena proses hidrasi sekunder pozzolanic dari *fly ash* pada umur pengujian ini belum berlangsung secara sempurna, sehingga meninggalkan sejumlah pori kapiler mikro yang masih dapat dilalui air (Triwulan et al, 2017). Sementara itu, penurunan daya serap air yang signifikan pada variasi *fiberglass* 2% membuktikan bahwa volume serat yang lebih padat mampu memotong kontinuitas pori-pori kapiler di dalam matriks mortar GRC. Keberadaan jaringan serat ini membatasi ruang penetrasi air ke dalam benda uji kubus GRC. Fenomena penahanan oleh serat mekanis ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Wibawa dkk., 2019). Meskipun terjadi fluktuasi, seluruh variasi inovasi GRC ini tetap memenuhi spesifikasi kelayakan karena nilainya berada di bawah batas maksimum yang disyaratkan ASTM C642 yaitu 11%.

4.3.2 Pengujian Daya Serap Air Porositas

Pengujian porositas dilaksanakan setelah pengujian daya serap air, yaitu setelah proses perebusan. Benda uji digantung menggunakan kawat fleksibel pada pengait timbangan hidrostatik, yang kemudian ditimbang dengan posisi melayang dan terendam sepenuhnya di dalam air. Pengujian porositas dapat dihitung dengan rumus (3), sebagai contoh perhitungan porositas variasi A0_FA0FG1 dapat dilihat dibawah ini:

$$\text{Variasi A0_FA0FG1 (1)} = \frac{291,1 - 268}{291,1 - 158,2} \times 100 = 17,38\%$$

$$\text{Variasi A0_FA0FG1 (2)} = \frac{290,4 - 268}{290,4 - 157,9} \times 100 = 16,91\%$$

$$\text{Rata-rata daya serap air variasi A0_FA0FG1} = 17,14\%$$

Perhitungan detail untuk variasi inovasi GRC lainnya dilakukan dengan metode perhitungan yang sama dan disajikan secara lengkap pada lampiran 12. Adapun data hasil pengujian porositas untuk seluruh variasi disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 4.11 Hasil Uji Porositas

Variasi	Sampel	Massa Kering Oven (A) (gr)	Massa Jenuh Rebus (C) (gr)	Massa Semu Air (D) (gr)	Porositas (%)	Rata – rata (%)
A0_FA0FG1	1	268	291,1	158,2	17,38	17,14
	2	268	290,4	157,9	16,91	
A1_FA5FG1	1	266,1	291,5	156,6	18,83	18,58
	2	267,4	292,1	157,3	18,32	
A2_FA10FG1	1	268,7	294,8	158,8	19,19	18,83
	2	270	295	159,6	18,46	
A3_FA5FG2	1	267,7	290	157,5	16,83	16,67
	2	266,4	288,2	156,2	16,52	
A4_FA10FG2	1	286,1	311,9	169,9	18,17	17,93
	2	288	313,2	170,8	17,70	

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

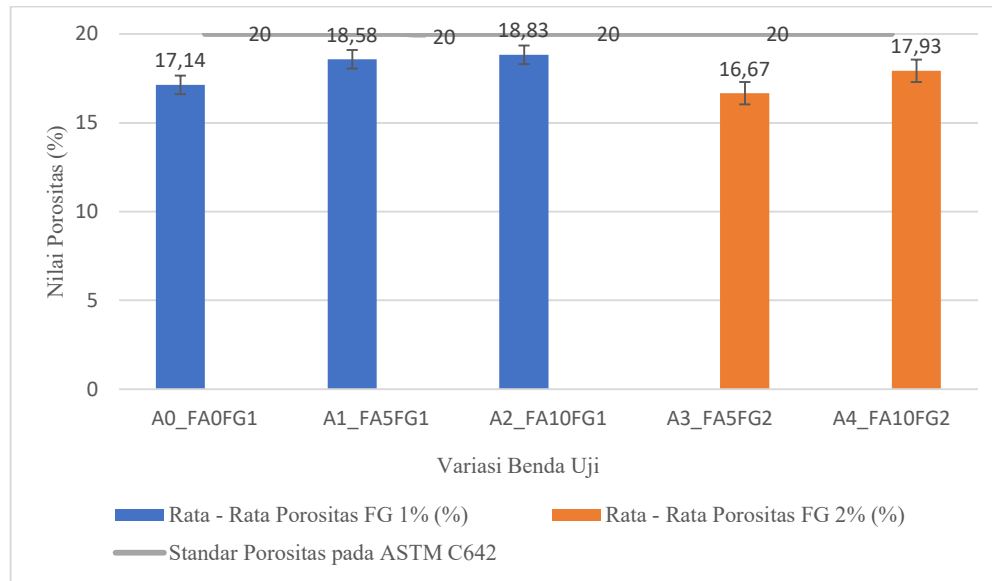
Secara keseluruhan hasil pengujian porositas mortar GRC ini dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4.12 Rekapitulasi Hasil Uji Porositas

Variasi	Nilai Maksimum Porositas (%)	Rata – Rata Hasil Uji Porositas (%)
A0_FA0FG1	20	17,14
A1_FA5FG1	20	18,58
A2_FA10FG1	20	18,83
A3_FA5FG2	20	16,67
A4_FA10FG2	20	17,93

Sumber : Hasil Analisis Pengujian, 2026

Berdasarkan Tabel 4.12, hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi mortar GRC memiliki nilai porositas yang masih memenuhi persyaratan ASTM C642, yaitu berada di bawah batas maksimum sebesar 20%. Perbandingan nilai porositas pada setiap variasi campuran selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik Hasil Uji Porositas

Gambar 4.4 menjelaskan hubungan antara variasi presentase substitusi *fly ash* dan penambahan *fiberglass* terhadap nilai rata – rata porositas pada GRC. Berdasarkan grafik tersebut, secara umum terlihat adanya tren peningkatan nilai porositas seiring dengan bertambahnya persentase substitusi *fly ash* di dalam campuran. Sebaliknya, peningkatan kadar *fiberglass* dari 1% menjadi 2% memberikan tren penurunan nilai porositas secara konsisten pada tingkat substitusi *fly ash* yang sama.

Pada variasi kandungan *fiberglass* sebesar 1% yaitu variasi A0_FA0FG1; A1_FA5FG1; A2_FA10FG1, peningkatan kadar *fly ash* dari 0% ke 10% secara konsisten menaikkan nilai rata – rata porositas dari 17,14% hingga 18,83%. Tren kenaikan yang serupa juga terdapat pada variasi *fiberglass* 2%, di mana penambahan *fly ash* 5% pada A3_FA5FG2 ke 10% pada A4_FA10FG2 meningkatkan nilai porositas dari 16,67% menjadi 17,93%. Disisi lain pada gambar 4.2 juga memperlihatkan tren penurunan porositas yang signifikan akibat pengaruh penambahan presentase *fiberglass*. Ketika kadar *fiberglass* ditingkankan 1% menjadi 2%, nilai porositas mengalami penurunan yang konsisten. Seperti pada variasi A1_FA5FG1 dan A3_FA5FG2 dengan presentase *fly ash* yang sama yaitu 5%, pada A3_FA5FG2 memiliki nilai porositas lebih rendah sebesar 16,67% dibandingkan dengan variasi *fiberglass* 1% atau pada variasi A1_FA5FG1 sebesar

18,58%. Selanjutnya, pada variasi A4_FA10FG2 penambahan *fiberglass* terbukti mampu menahan laju pembentukan rongga dengan menghasilkan nilai porositas sebesar 17,93%, yang mana nilai ini lebih kecil jika dibandingkan dengan variasi A2_FA10FG1 sebesar 18,83%.

Tren kenaikan porositas akibat peningkatan kadar *fly ash* mengindikasikan bahwa pada umur pengujian ini, reaksi pozzolanik sekunder dari *fly ash* belum sepenuhnya matang untuk memproduksi gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang cukup untuk menutup pori-pori mikro mortar pracetak (Nugroho & Setyanto, 2021). Namun, tren penurunan porositas pada penggunaan *fiberglass* 2% membuktikan peran mekanis serat dalam menjembatani retak mikro internal (*micro-cracks*) selama proses pengerasan beton. Distribusi serat yang lebih padat mereduksi volume rongga udara di dalam matriks GRC. Perilaku penurunan porositas akibat kontribusi serat ini sejalan dengan hasil studi terdahulu oleh (Wibawa et al., 2019). Adapun seluruh variasi benda uji GRC memenuhi standar kelayakan karena nilainya berada di bawah garis batas maksimum yang disyaratkan oleh ASTM C642 sebesar 20%.

4.4 Analisa Biaya Material Pada Mortar GRC

Analisa biaya dilakukan untuk membandingkan produksi antara GRC secara konvensional dengan inovasi substitusi *fly ash* pada semen. Analisa ini hanya mencakup biaya material tanpa biaya upah tenaga kerja, penggunaan alat, serta biaya operasional. Analisa ini digunakan untuk mengetahui efisiensi biaya produksi pada setiap variasi. Berikut beberapa referensi toko bangunan terkait pengadaan material yang akan digunakan. Tujuan dari langkah ini adalah untuk mengidentifikasi harga setiap material yang digunakan, sehingga analisis biaya yang dihasilkan lebih relevan dan sesuai dengan kondisi lapangan yang ada. Material yang disurvei meliputi pasir, semen, *fly ash*, *fiberglass*, dan *superplasticizer*. Berikut harga yang diperoleh dari survey pada tabel 4.13.

Tabel 4.13 Survei Toko Material

No	Nama Toko	Alamat	Keterangan
1.	Pasir Tb. Combo Putra	Jl. Turnojoyo X No. 2, Padangsari, Kec. Banyumanik, Kota Semarang, Jawa Tengah, 50267	Toko bangunan
2.	Pasir Tb. Lewi	Jl. Banjarsari No.16 B, Pedalangan, Kec. Banyumanik, Kota Semarang, Jawa Tengah, 50268	Toko bangunan
3.	Pasir Tb. Merapi	Jl. Durian Raya No. 54, Srandol Wetan, Kec. Banyumanik, Kota Semarang, Jawa Tengah, 50263	Toko bangunan
4.	Semen Pusat Teknik Semarang	Jl. Madukoro Raya No.187 C, Kota Semarang	Toko bangunan
5.	Semen Tb. Sinar Logam	Jl. Mataram No.55, Rejowinangun Utara, Kec. Magelang Tengah, Kota Magelang, Jawa Tengah, 56214	Toko bangunan
6.	Pengepul <i>Fly ash</i>	Mangunharjo, Kota Semarang, Jawa Tengah	<i>Fly ash</i> PLTU Batang
7.	<i>Fiberglass</i> Chemposite Store	Jl. Temban No 57C, Bubutan, Kec. Bubutan, Surabaya, Jawa Timur, 60174	Toko Grosir Bahan Kimia
10.	<i>Superplasticizer</i> Benabadi Sejahtera	Jl. Permata Safira Regency No. E5, Lidah Kulon, Kec. Lakarsantri, Surabaya, Jawa Timur, 60213	Toko Bahan Kimia

Sumber : Hasil Analisis, 2026

Kebutuhan banyaknya material untuk 1m³ dengan ukuran 1 prototype 400 x 200 mm atau 40 x 20 cm adalah 800 cm². Kebutuhan untuk 1 m³ yaitu :

$$= \frac{10.000}{800} = 12,5 \text{ buah/m}^2$$

Rincian harga satuan biaya dibawah ini disusun berdasarkan data yang diperoleh dari hasil survey lapangan berdasar tabel 4.14.

Tabel 4.14 Harga Satuan Biaya

No	Material	Satuan	Harga Satuan (Rp)			Harga Bahan Digunakan (Rp)
			Tb. Combo	Tb. Lewi	Tb. Merapi	
1.	Pasir	1 Kg	1.066	300	263	263
2.	Semen	1 Kg	1.662	3.395	1.650	1.650
3.	<i>Fly ash</i>	1 Kg		625		625
4.	Air	1 Kg		6		6
5.	<i>Fiberglass</i>	1 Kg		17.200		17.200
6.	<i>Superplasticizer</i>	1 Kg		86.400		86.400

Sumber : Hasil Analisis, 2026

Berikut perhitungan Analisa biaya untuk beberapa variasi :

1. GRC variasi A0_FA0FG1

Variasi A0_FA0FG1 pada GRC digunakan sebagai acuan atau kontrol dengan komposisi 0% *fly ash* dan penambahan *fiberglass* sebesar 1%. Berikut Analisa biaya pembuatan GRC variasi A0_FA0FG1 yang ditunjukkan pada tabel 4.15.

Tabel 4.15 Rincian Biaya Material GRC Variasi A0_FA0FG1

No	Material	Kebutuhan per 1 buah	Satuan	Harga Bahan Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1.	Pasir	1,424	Kg	263	374
2.	Semen	1,424	Kg	1.650	2.350
3.	<i>Fly ash</i>	0	Kg	625	-
4.	Air	0,427	Kg	6	2,56
5.	<i>Fiberglass</i>	0,033	Kg	17.200	563
6.	<i>Superplasticizer</i>	0,004	Kg	86.400	369
Total Biaya 1 Buah					3.660
Total Biaya 1 m2					45.750

Sumber : Hasil Analisis, 2026

2. GRC variasi A1_FA5FG1

Pada variasi GRC A1_FA5FG1 menggunakan komposisi substitusi *fly ash* sebesar 5% dan bahan tambah *fiberglass* sebesar 1%. Berikut Analisa biaya pembuatan GRC variasi A1_FA5FG1 yang ditunjukkan pada tabel 4.16.

Tabel 4.16 Rincian Biaya Material GRC Variasi A1_FA5FG1

No	Material	Kebutuhan per 1 buah	Satuan	Harga Bahan Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1.	Pasir	1,424	Kg	263	374
2.	Semen	1,353	Kg	1.650	2.232
3.	<i>Fly ash</i>	0,071	Kg	625	44,51
4.	Air	0,427	Kg	6	2,56
5.	<i>Fiberglass</i>	0,033	Kg	17.200	563
6.	<i>Superplasticizer</i>	0,004	Kg	86.400	369
Total Biaya 1 Buah					3.587
Total Biaya 1 m2					44.837

Sumber : Hasil Analisis, 2026

3. GRC variasi A2_FA10FG1

Pada variasi GRC A2_FA10FG1 menggunakan komposisi substitusi *fly ash* sebesar 10% dan bahan tambah *fiberglass* sebesar 1%. Berikut Analisa biaya pembuatan GRC variasi A2_FA10FG1 yang ditunjukkan pada tabel 4.17.

Tabel 4.17 Rincian Biaya Material GRC Variasi A2_FA10FG1

No	Material	Kebutuhan per 1 buah	Satuan	Harga Bahan Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1.	Pasir	1,424	Kg	263	374
2.	Semen	1,282	Kg	1.650	2.115
3.	<i>Fly ash</i>	0,142	Kg	625	89,02
4.	Air	0,427	Kg	6	2,56
5.	<i>Fiberglass</i>	0,033	Kg	17.200	563
6.	<i>Superplasticizer</i>	0,004	Kg	86.400	369,19
Total Biaya 1 Buah					3.514
Total Biaya 1 m2					43.925

Sumber : Hasil Analisis, 2026

4. GRC variasi A3_FA5FG2

Pada variasi GRC A3_FA5FG2 menggunakan komposisi substitusi *fly ash* sebesar 5% dan bahan tambah *fiberglass* sebesar 2%. Berikut Analisa biaya pembuatan GRC variasi A3_FA5FG2 yang ditunjukkan pada tabel 4.18.

Tabel 4.18 Rincian Biaya Material GRC Variasi A3_FA5FG2

No	Material	Kebutuhan per 1 buah	Satuan	Harga Bahan Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1.	Pasir	1,424	Kg	263	374,60
2.	Semen	1,353	Kg	1.650	2.232
3.	<i>Fly ash</i>	0,071	Kg	625	44,51

4	Air	0,427	Kg	6	2,56
5.	<i>Fiberglass</i>	0,066	Kg	17.200	1.126
6.	<i>Superplasticizer</i>	0,004	Kg	176.106	369
Total Biaya 1 Buah					4.150
Total Biaya 1 m2					51.880

Sumber : Hasil Analisis, 2026

5. GRC variasi A4_FA10FG2

Pada variasi GRC A4_FA10FG2 menggunakan komposisi substitusi *fly ash* sebesar 10% dan bahan tambah *fiberglass* sebesar 2%. Berikut Analisa biaya pembuatan GRC variasi A3_FA5FG2 yang ditunjukkan pada tabel 4.19.

Tabel 4.19 Rincian Biaya Material GRC Variasi A4_FA10FG2

No	Material	Kebutuhan per 1 buah	Satuan	Harga Bahan Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1.	Pasir	1,424	Kg	263	374
2.	Semen	1,282	Kg	1.650	2.115
3.	<i>Fly ash</i>	0,142	Kg	625	89,02
4	Air	0,427	Kg	6	2,56
5.	<i>Fiberglass</i>	0,066	Kg	17.200	1.126
6.	<i>Superplasticizer</i>	0,004	Kg	86.400	369
Total Biaya 1 Buah					4.077
Total Biaya 1 m2					50.968

Sumber : Hasil Analisis, 2026

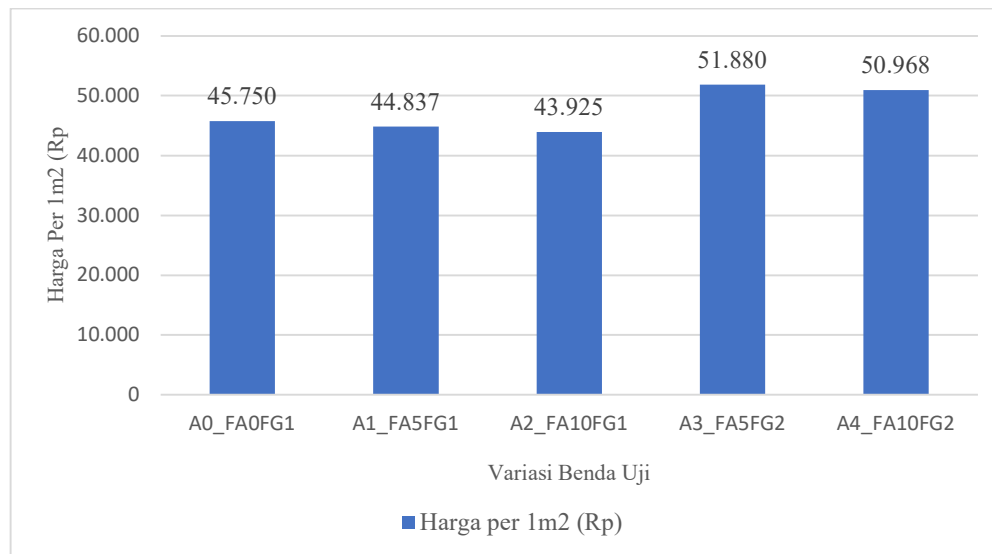
Untuk mengetahui perbedaan biaya produksi untuk setiap variasi GRC, rekapitulasi Analisa biaya dilakukan berdasarkan tabel rincian harga material untuk setiap variasi campuran. Rekapitulasi biaya material dapat dilihat pada table 4.20.

Tabel 4.20 Rekapitulasi Analisa Harga Material

No	Variasi	Biaya per 1 GRC (Rp)	Biaya Per 1m2 (Rp)
1.	A0_FA0FG1	3.660	45.750
2.	A1_FA5FG1	3.587	44.837
3.	A2_FA10FG1	3.514	43.925
4.	A3_FA5FG2	4.150	51.880
5.	A4_FA10FG2	4.077	50.968

Sumber : Hasil Analisis Perhitungan, 2026

Hasil dari analisis perbandingan biaya material produksi GRC pada berbagai variasi dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar 4.5 Grafik Analisa Biaya Material Inovasi GRC

Gambar 4.5 menyajikan grafik analisis perbandingan biaya material produksi inovasi panel GRC per m2 untuk setiap variasi campuran. Berdasarkan grafik tersebut, secara umum terlihat adanya dua tren pergerakan biaya yang kontras. Penambahan persentase substitusi *fly ash* terbukti memberikan tren penurunan biaya produksi pada tingkat kandungan serat yang sama. Sebaliknya, peningkatan volume *fiberglass* dari 1% menjadi 2% memberikan pengaruh yang sangat mendominasi berupa tren kenaikan biaya material secara signifikan.

Pada variasi dengan kandungan *fiberglass* 1%, substitusi *fly ash* berhasil menekan biaya material secara bertahap dari Rp45.750 pada variasi kontrol A0_FA0FG1, turun menjadi Rp44.837 pada variasi A1_FA5FG1, dan mencapai titik terendah kelompok ini pada variasi A2FA10FG1 sebesar Rp43.925. Namun, lonjakan biaya yang tajam terjadi ketika kadar *fiberglass* ditingkatkan menjadi 2% pada variasi A3_FA5FG2 di mana biayanya meningkat drastis menjadi Rp51.880. Pada kelompok *fiberglass* 2% ini, peran *fly ash* kembali terlihat dalam menekan pengeluaran, di mana variasi A4_FA10FG2 mengalami penurunan biaya menjadi Rp50.968 dibandingkan dengan variasi A3_FA5FG2.

Tren penurunan biaya oleh *fly ash* disebabkan oleh status material ini yang merupakan limbah industri bernilai ekonomis rendah, sehingga mampu memotong

kebutuhan anggaran semen murni yang harganya jauh lebih mahal di pasaran. Di sisi lain, peningkatan biaya yang sangat signifikan pada variasi A3_FA5FG2 dan A4_FA10FG2 mengonfirmasi bahwa *fiberglass* bertindak sebagai komponen penentu utama (*cost driver*) dalam analisis ekonomi GRC ini. Hal tersebut dikarenakan *fiberglass* jenis AR (*Alkali Resistant*) merupakan material pabrikan khusus berteknologi tinggi yang memiliki harga satuan per kilogram jauh lebih tinggi dibandingkan material penyusun lainnya. Meskipun demikian, kombinasi optimal antara limbah *fly ash* dan *fiberglass* pada penelitian ini terbukti tetap mampu menghasilkan alternatif bahan konstruksi yang efisien secara biaya

4.5 Analisa Hubungan Antara Kuat Lentur, Daya Serap Air, Porositas dan Biaya Material pada Inovasi GRC.

Berdasarkan hasil pengujian kuat lentur, daya serap air, dan analisa biaya material dari inovasi GRC dapat dilihat melalui rekapitulasi dari tabel berikut:

Tabel 4.21 Rekapitulasi Hasil Pengujian

Variasi Inovasi GRC	Pengujian			
	Kuat Lentur (MPa)	Daya Serap Air (%)	Porositas (%)	Analisa Biaya Material (Rp)
A0_FA0FG1	6,20	8,49	17,14	45.750
A1_FA5FG1	17,40	9,22	18,58	44.837
A2_FA10FG1	21,80	9,49	18,83	43.925
A3_FA5FG2	20,60	8,42	16,67	51.880
A4_FA10FG2	24,60	8,91	17,93	50.968

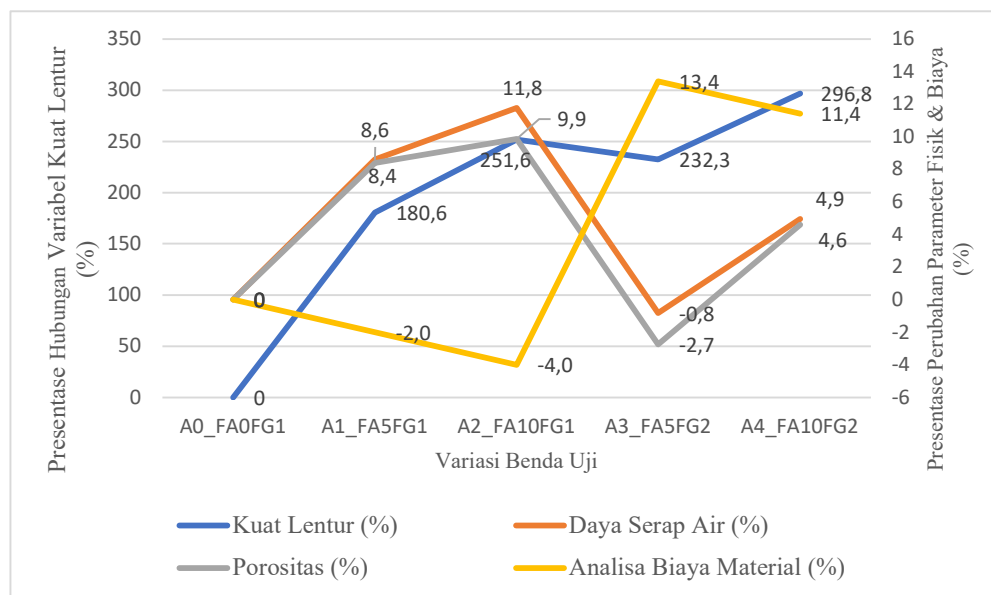
Sumber : Hasil Analisis Perhitungan, 2026

Berdasarkan hasil data diatas dapat disimpulkan bahwa hasil pengujian kuat lentur, daya serap air, porositas, hingga biaya material pada inovasi GRC menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai bahan substitusi semen dan bahan tambah *fiberglass* memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik dari mortar. Dari hasil tersebut dilakukan analisis melalui perhitungan presentase perubahan terhadap variasi A0_FA0FG1 yang digunakan sebagai kontrol untuk mengetahui kecenderungan hubungan antara komposisi material dengan kinerja GRC secara lebih sistematis, sehingga dapat diketahui batas optimal pemanfaatan material tambahan dalam penelitian ini. Perhitungan presentase dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Rekapitulasi Presentase Hubungan Variabel

Variasi Inovasi GRC	Pengujian			Analisa Biaya Material (Rp)
	Kuat Lentur (MPa)	Daya Serap Air (%)	Porositas (%)	
A0_FA0FG1	0	0	0	0,00
A1_FA5FG1	180,6	8,6	8,4	-2,00
A2_FA10FG1	251,6	11,8	9,9	-4
A3_FA5FG2	232,3	-0,8	-2,7	13,40
A4_FA10FG2	296,8	4,9	4,6	11,41

Sumber : Hasil Analisis Perhitungan, 2026

**Gambar 4.6** Grafik Presentase Hubungan Variabel

Berdasarkan grafik hubungan pada gambar 4.6, terlihat adanya hubungan sebab - akibat dan interaksi fisik-ekonomi yang berkesinambungan antar parameter yang diuji yaitu kuat lentur, daya serap air, porositas, dan biaya material produksi.

Secara fisik dan mekanis, terdapat korelasi yang berbanding lurus antara nilai porositas dan daya serap air, di mana keduanya berbanding terbalik terhadap nilai kuat lentur benda uji. Fenomena ini terlihat jelas saat membandingkan variasi kelompok serat 1% A0_FA0FG1 ke A2_FA10FG1 maupun kelompok serat 2% pada variasi A3_FA5FG2 ke A4_FA10FG2. Peningkatan persentase substitusi *fly ash* memicu reaksi pozzolanik sekunder yang menghasilkan gel C-S-H tambahan untuk mengisi rongga-rongga kapiler mikro (*pore-filling effect*) (Pujianto, 2010).

Berkurangnya rongga mikro ini secara langsung menurunkan persentase porositas matriks, yang secara otomatis membatasi ruang bagi air untuk meresap ke dalam beton sehingga nilai daya serap air ikut menurun (Intan S. et al, 2017). Matriks mortar yang semakin rapat dan minim pori ini menciptakan struktur yang kokoh dan memberikan jepitan mekanis yang optimal pada permukaan serat *fiberglass* (Setiawan & Dananjaya, 2020). Akibatnya, transfer tegangan saat menerima beban bekerja secara maksimal dan membuat nilai kuat lentur secara signifikan hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 24,60 MPa pada variasi A4_FA10FG2.

Efek kepadatan mikro ini juga menjelaskan fluktuasi pada variasi A2_FA10FG1 ke A3_FA5FG2. Ketika kadar *fiberglass* dinaikan menjadi 2%, porositas material mengalami penurunan ke titik terendahnya yaitu sebesar 16,67% yang berdampak juga pada penurunan daya serap air yaitu sebesar 8,42%. Penurunan porositas yang drastis ini dipengaruhi oleh tercapainya tingkat kelecakan (*workability*) yang paling optimum pada kombinasi *fly ash* 5% dan serat 2%. Meskipun adukan menjadi lebih kaku akibat peningkatan volume serat, komposisi pada variasi A3_FA5FG2 ini memungkinkan proses pemadatan di laboratorium berjalan sangat efektif dalam mengeluarkan udara yang terperangkap tanpa memicu penggumpalan serat. Kerapatan matriks yang optimum ini berhasil mempertahankan kinerja mekanis kuat lentur GRC tetap tinggi sebesar 20,60 MPa, sekaligus membuktikan bahwa efektivitas dari serat sangat bergantung pada integritas kepadatan ruang pori di sekelilingnya.

Dari segi ekonomi, interaksi antar parameter ini menunjukkan optimasi yang sangat menguntungkan karena kandungan *fly ash* terbukti bertindak sebagai bahan substitusi yang multifungsi yaitu tidak hanya memperbaiki performa fisik dan mekanis seperti menurunkan daya serap, porositas dan menaikkan kuat lentur, tetapi juga secara efektif mereduksi biaya material produksi hingga titik terendah yaitu sebesar Rp43.925,00/m² pada variasi A2_FA10FG1. Sebaliknya, serat *fiberglass* bertindak sebagai penentu utama kenaikan biaya (*cost driver*) seiring peningkatan kinerjanya sebagai penahan retak. Secara keseluruhan, analisis keterkaitan ini menegaskan bahwa rekayasa campuran pada inovasi GRC ini berhasil mencapai

titik keseimbangan optimal (*optimum trade-off*), di mana peningkatan mutu mekanis dan karakteristik kedap air yang terstandarisasi ASTM C947 & GRCA Grade 10 dapat diperoleh dengan efisiensi biaya material yang tetap terkendali dibandingkan dengan GRC konvensional.

Secara aplikatif, karakteristik tersebut menunjukkan bahwa inovasi GRC yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai bahan material arsitektural seperti dinding, fasad bangunan yang tidak hanya berfungsi sebagai elemen pembatas atau estetika, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap keamanan dan nilai ekonomis. Penggunaan material ini dapat dipertimbangkan pada dinding, fasad bangunan, dan plafon.