

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas perihal hasil percobaan yang telah dikembangkan pada proses pembuatan dengan inovatif material menggunakan abu sekam padi sebagai substitusi sebagian semen dan limbah serbuk kaca sebagai substitusi pasir. Data yang diperoleh pada setiap variasi sampel disajikan, dengan fokus pada evaluasi sifat, karakteristik fisik, dan sifat mekaniknya. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kuat tekan, berat jenis (densitas), dan daya serap air.

4.1 Analisis Pengujian Material

Pada tahap awal penelitian ini adalah pengujian material dasar sebelum memasuki proses pembuatan sampel. Prosedur ini dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik fisis maupun kimia dari setiap bahan penyusun campuran roster. Melalui pemahaman terhadap sifat masing-masing material, peneliti dapat memastikan bahwa kesesuaian dengan standar mutu telah dipenuhi oleh komposisi yang digunakan serta dapat menghasilkan produk akhir yang optimal sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan.

4.1.1 Semen

Penilaian mutu semen sebagai bahan pengikat utama dalam campuran roster dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu pengamatan fisik, penetapan konsistensi normal semen, dan pemeriksaan waktu ikat awal semen. Pemeriksaan secara visual dilakukan untuk memastikan kondisi semen masih baik, tidak mengalami penggumpalan, serta tidak terpengaruh kelembapan udara yang dapat mengganggu proses hidrasi. Selanjutnya, dilakukan penetapan konsistensi normal semen untuk mengetahui kebutuhan air yang optimal dalam proses pencampuran, serta pengujian waktu ikat awal guna mengetahui durasi awal pengerasan semen. Kedua parameter ini penting untuk mengontrol kemudahan pengerjaan (*workability*) dan memastikan proses pengikatan berlangsung sesuai dengan standar yang ditetapkan.

a. Pemeriksaan Visual

Pemeriksaan visual dilakukan untuk mengetahui kondisi fisik semen yang akan digunakan dalam penelitian. Pengamatan meliputi warna, tekstur, dan adanya

gumpalan pada semen. Berdasarkan hasil pengamatan, semen yang digunakan memiliki warna abu-abu kehijauan yang seragam, bertekstur halus, serta tidak ditemukan adanya gumpalan keras.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa semen masih dalam keadaan baik dan layak digunakan sebagai bahan penyusun mortar. Semen yang tidak menggumpal menandakan bahwa material belum mengalami hidrasi dini akibat paparan kelembapan selama proses penyimpanan. Selain itu, warna yang seragam menunjukkan bahwa komposisi bahan penyusun semen relatif homogen.

Hasil pemeriksaan visual ini sesuai dengan karakteristik semen Portland yang baik, yaitu memiliki warna abu-abu kehijauan, berbentuk serbuk halus, dan bebas dari gumpalan yang dapat memengaruhi proses pencampuran serta kualitas mortar yang dihasilkan. Oleh karena itu, semen yang digunakan memenuhi persyaratan awal untuk digunakan dalam penelitian pembuatan roster mortar.

b. Penetapan konsistensi normal semen

Pengujian konsistensi normal dilakukan menggunakan alat Vicat untuk menentukan jumlah air yang diperlukan agar pasta semen mencapai tingkat kelecakan standar. Nilai konsistensi normal diperoleh dari persentase air yang menghasilkan penetrasi jarum Vicat hingga mencapai jarak 10 ± 1 mm dari dasar cetakan.

Hasil dari pengujian ini digunakan sebagai acuan dalam pelaksanaan uji lanjutan, seperti penentuan waktu ikat awal dan akhir, serta membantu menjaga kemudahan pengerjaan dan kestabilan mutu campuran mortar. Hasil pemeriksaan pengujian konsistensi normal semen dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Penetapan Konsistensi Normal Semen Variasi A

No	Berat Semen (gr)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum Suhu (mm)
1	300	26	6
2	300	27	8
3	300	28	10

Dapat dilihat pada Tabel 4.1, hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai konsistensi normal semen variasi A sebesar 28%. Nilai tersebut ditentukan

berdasarkan jumlah air yang diperlukan hingga jarum Vicat mengalami penetrasi sebesar 10 mm dari dasar cetakan. Berdasarkan ketentuan dalam SNI 03-1974-1990, kondisi tersebut menunjukkan bahwa pasta semen telah mencapai konsistensi normal.

Tabel 4. 2 Hasil Penetapan Konsistensi Normal Semen Variasi B

No	Berat Semen (gr)	Abu Sekam (gr)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum Suhu (mm)
1	285	15	35	8
2	285	15	36	11
3	285	15	37	29

Berdasarkan Tabel 4.2, hasil pengujian menunjukkan bahwa jarum vicat belum mendapatkan kedalaman 10 mm pada persentase air yang diuji. Dengan itu digunakan perhitungan interpolasi untuk mendapatkan nilai konsistensi normal semen menggunakan persamaan 1. Jadi, penetapan konsentrasi normal pada variasi B yaitu dengan persentase air 35,6%.

Tabel 4. 3 Hasil Penetapan Konsistensi Normal Semen Variasi C

No	Berat Semen (gr)	Abu Sekam (gr)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum Suhu (mm)
1	270	30	37	5
2	270	30	38	9
3	270	30	39	11

Berdasarkan Tabel 4.3, hasil pengujian menunjukkan bahwa jarum vicat belum mendapatkan kedalaman 10 mm pada persentase air yang diuji. Dengan itu digunakan perhitungan interpolasi untuk mendapatkan nilai konsistensi normal semen menggunakan persamaan 1. Jadi, penetapan konsentrasi normal pada variasi C yaitu dengan persentase air 38,5%

Tabel 4. 4 Hasil Penetapan Konsistensi Normal Semen Variasi D

No	Berat Semen (gr)	Abu Sekam (gr)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum Suhu (mm)
1	262,5	37,5	38	8
2	262,5	37,5	40	23
3	262,5	37,5	41	30

Berdasarkan Tabel 4.4, hasil pengujian menunjukkan bahwa jarum vicat belum mendapatkan kedalaman 10 mm pada persentase air yang diuji. Dengan itu digunakan perhitungan interpolasi untuk mendapatkan nilai konsistensi

normal semen menggunakan persamaan 1. Jadi, penetapan konsentrasi normal pada variasi D yaitu dengan persentase air 38,26%.

Tabel 4. 5 Rekapitulasi Konsistensi Normal Semen

No	Variasi	Persentase Air (%)
1	A	28
2	B	35,6
3	C	38,5
4	D	38,26

Berdasarkan Tabel 4.5 tentang rekapitulasi konsistensi normal semen, dapat dilihat bahwa setiap variasi campuran memerlukan persentase air yang berbeda untuk mencapai kondisi konsistensi normal. Variasi A membutuhkan air sebesar 28%, sedangkan variasi B meningkat menjadi 35,6%. Pada variasi C, persentase air yang digunakan sedikit lebih tinggi yaitu 38,5%. Sementara itu, variasi D memiliki kebutuhan air sebesar 38,26%.

Dari data tersebut terlihat bahwa kebutuhan air cenderung meningkat dari variasi A hingga C, yang menunjukkan adanya pengaruh komposisi material terhadap daya serap dan workability campuran. Namun, pada variasi D terjadi sedikit penurunan dibandingkan variasi C, meskipun nilainya masih berada pada kisaran yang tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi D telah mencapai kondisi konsistensi normal dengan persentase air sebesar 38,26%, sesuai dengan hasil pengujian menggunakan alat Vicat.

c. Pemeriksaan Waktu Ikat Awal Semen

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 2049:2015, waktu ikat awal semen portland disyaratkan tidak kurang dari 45 menit. Dengan demikian, hasil pengujian yang diperoleh dapat digunakan untuk menilai apakah semen masih memenuhi standar kelayakan sebagai bahan peingkat kelayakan sebagai bahan pengikat. Hasil pengujian waktu ikat awal semen dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Waktu Ikat Awal Semen Variasi A

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)
1	0	42
2	15	33
3	30	28
4	45	20

Dapat dilihat dalam Tabel 4.6 hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu ikat awal semen variasi A dengan campuran 95% semen dan 5% abu sekam padi tercapai pada menit ke-45. Nilai tersebut diperoleh dari pengamatan penurunan jarum Vicat secara berkala setiap 15 menit, hingga mencapai kedalaman penetrasi sebesar ± 20 mm dari permukaan pasta semen. Kondisi ini menandakan bahwa pasta semen mulai kehilangan sifat plastisnya dan memasuki tahap awal proses pengerasan.

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Waktu Ikat Awal Semen Variasi B

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)
1	0	41
2	15	41
3	30	41
4	45	40
5	60	40
6	75	38
7	90	34
8	105	34
9	120	30
10	135	24
11	150	22
12	165	19

Berdasarkan Tabel 4.7, hasil pengujian menunjukkan bahwa jarum vicat belum mendapatkan kedalaman penetrasi 20 mm dari pengamatan penurunan jarum Vicat secara berkala setiap 15 menit. Dengan itu digunakan perhitungan interpolasi untuk mendapatkan nilai waktu ikat awal semen untuk variasi B dengan campuran 95% semen dan 5% abu sekam padi menggunakan persamaan 2. Jadi, waktu ikat awal semen pada variasi B dengan campuran 90% semen dan 10% abu sekam padi yaitu pada menit ke-160.

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Waktu Ikat Awal Semen Variasi C

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)
1	0	43
2	15	43
3	30	43
4	45	42
5	60	40
6	75	40
7	90	37
8	105	35
9	120	34

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)
10	135	32
11	150	32
12	165	30
13	180	29
14	195	26
15	210	25
16	225	22
17	240	20

Berdasarkan Tabel 4.8, hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu ikat awal semen variasi C dengan campuran 90% semen dan 10% abu sekam padi tercapai pada menit ke-240. Nilai tersebut diperoleh dari pengamatan penurunan jarum Vicat secara berkala setiap 15 menit, hingga mencapai kedalaman penetrasi sebesar ± 20 mm dari permukaan pasta semen. Kondisi ini menandakan bahwa pasta semen mulai kehilangan sifat plastisnya dan memasuki tahap awal proses pengerasan.

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Waktu Ikat Awal Semen Variasi D

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)
1	0	44
2	15	43
3	30	43
4	45	43
5	60	39
6	75	39
7	90	38
8	105	38
9	120	34
10	135	34
11	150	33
12	165	31
13	180	31
14	195	30
15	210	28
16	225	28
17	240	25
18	255	25
19	260	24
20	275	23
21	290	21
22	305	21
23	320	20

Berdasarkan Tabel 4.9, hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu ikat awal semen variasi C dengan campuran 87,5% semen dan 12,5% abu sekam

padi tercapai pada menit ke-320. Nilai tersebut diperoleh dari pengamatan penurunan jarum Vicat secara berkala setiap 15 menit, hingga mencapai kedalaman penetrasi sebesar ± 20 mm dari permukaan pasta semen. Kondisi ini menandakan bahwa pasta semen mulai kehilangan sifat plastisnya dan memasuki tahap awal proses pengerasan.

Tabel 4. 10 Rekapitulasi Waktu Ikat Awal Semen

No	Variasi	Campuran	Waktu Penurunan (menit)
1	A	100% PPC dan 0% Abu Sekam Padi	45
2	B	95% PPC dan 5% Abu Sekam Padi	160
3	C	90% PPC dan 10% Abu Sekam Padi	240
4	D	87,5% PPC dan 12,5% Abu Sekam Padi	320

Berdasarkan hasil pengujian waktu ikat awal yang tertera pada Tabel 4.10, terlihat bahwa semakin besar persentase abu sekam padi yang digunakan, maka waktu ikat awal campuran semakin lama. Variasi A tanpa substitusi abu sekam padi memiliki waktu ikat awal tercepat yaitu 45 menit. Setelah dilakukan substitusi abu sekam sebesar 5% pada variasi B, waktu ikat awal meningkat menjadi 160 menit. Pada substitusi 10%, waktu ikat awal kembali meningkat menjadi 240 menit, sedangkan pada substitusi 12,5% diperoleh waktu ikat awal terlama yaitu 320 menit.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa abu sekam padi memperlambat proses pengikatan awal campuran semen. Kondisi ini terjadi karena sebagian semen aktif tergantikan oleh abu sekam padi yang bersifat *pozzolan*, sehingga reaksi hidrasi awal berlangsung lebih lambat dibanding semen portland murni. Selain itu, abu sekam padi memiliki luas permukaan dan daya serap air yang tinggi sehingga kebutuhan air campuran meningkat dan proses pembentukan pasta kaku menjadi tertunda.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa peningkatan kadar abu sekam padi sebagai substitusi parsial semen berbanding lurus dengan peningkatan waktu ikat awal. Dengan kata lain, semakin tinggi kadar abu sekam padi, maka campuran membutuhkan waktu lebih lama untuk mulai mengeras.

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 2049:2015, waktu ikat awal semen portland disyaratkan tidak kurang dari 45 menit. Dengan demikian, hasil pengujian yang diperoleh menunjukkan bahwa semen masih memenuhi persyaratan standar. Hal ini menunjukkan bahwa semen memiliki waktu kerja yang cukup baik, sehingga memudahkan dalam proses pencampuran, pengangkutan, dan pengerjaan di lapangan. Oleh karena itu, semen tersebut layak difungsikan sebagai material pengikat dalam campuran pembuatan roster mortar.

4.1.2 Pasir

Pengujian terhadap pasir sebagai agregat halus dilakukan melalui beberapa tahapan untuk mengetahui kualitas dan sifat material sebelum digunakan dalam pembuatan roster. Berikut merupakan beberapa pengujian terhadap pasir pasang yang digunakan.

a. Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur dilakukan guna mengetahui sekaligus mengendalikan jumlah partikel halus atau kotoran yang terkandung dalam agregat halus. Pengujian ini penting karena kadar lumpur yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terganggunya ikatan antara semen dan pasir, sehingga berpotensi mereduksi kualitas roster yang dihasilkan.

Adapun hasil dari pengujian kadar lumpur tersebut telah disajikan dalam bentuk data dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Pemeriksaan Kadar Lumpur Pasir

No	Pengujian	Hasil	Satuan
1	Tinggi pasir + lumpur	205	ml
2	Tinggi pasir	200	ml
3	Tinggi lumpur	5	ml

Dari perolehan data pengujian tersebut, selanjutnya dilakukan analisis dan perhitungan menggunakan persamaan 3.

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

Keterangan:

A : Tinggi Lumpur (ml)

B : Tinggi Pasir (ml)

Perhitungan:

$$\begin{aligned} \text{Kadar Lumpur} &= \frac{(205 - 200)}{205} \times 100\% \\ &= \frac{5}{205} \times 100\% \\ &= 2,44\% \end{aligned}$$

Dari hasil analisis dan perhitungan yang telah dilaksanakan, diketahui bahwa kadar lumpur pada pasir sebesar 2,44%. Angka ini masih memenuhi batas yang diperbolehkan berdasarkan SNI 03-1750-1990, yaitu tidak melebihi 5%. Batas tersebut ditetapkan karena kandungan lumpur yang terlalu tinggi dapat menghambat terbentuknya ikatan yang baik antara semen dan agregat halus, sehingga berpotensi menurunkan mutu campuran mortar.

b. Gradasi Pasir

Pengujian gradasi pada agregat halus dilakukan guna mengetahui sebaran takaran butiran pasir melalui penggunaan beberapa variasi saringan. Tahapan ini bertujuan menggambarkan komposisi ukuran partikel yang bertindak dalam pengisian celah pada campuran roster sehingga mampu menghasilkan tingkat kepadatan yang optimal.

Dari serangkaian tahapan tersebut didapatkan data utama mengenai berat pasir yang tertinggal di setiap ayakan. Data ini kemudian diolah untuk menentukan persentase kumulatif tertahan serta persentase kumulatif yang lolos. Hasil hitungan tersebut selanjutnya dijadikan sebagai dasar dalam menentukan nilai Modulus Kehalusan (MH) dari pasir. Adapun hasil evaluasi gradasi agregat halus yang diterapkan dalam studi ini menunjukkan karakteristik sebagaimana tertera pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Pemeriksaan Gradasi Pasir

Saringan		Berat Tertahan
mm	Inci	Gram (a)
4.75	No. 4	24,5
2.36	No. 8	51,9
1.18	No. 16	102,5
0.60	No. 30	76,2
0.30	No. 50	119,3
0.15	No. 100	84,2
0.075	No. 200	37,5
Total (W)		496,1

Berdasarkan hasil pengujian gradasi, diperoleh data yang dianalisis menggunakan persamaan 4, yaitu sebagai berikut:

Perhitungan:

$$\begin{aligned}
 \text{Berat tertahan (\%)} &= \frac{\text{Berat tertahan}}{\text{Berat total}} \times 100\% \\
 &= \frac{24,5}{496,1} \times 100\% \\
 &= 4,939\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat kumulatif (\%)} &= \text{Persentase berat tertahan} + \text{persentase berat tertahan sebelumnya} \\
 &= 4,939\% + 0\% \\
 &= 4,939\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Lolos kumulatif (\%)} &= 100\% - \text{Persentase berat tertahan} \\
 &= 100\% - 4,939\% \\
 &= 95,061\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Moudulus halus butir} &= \frac{\sum \text{Berat tertahan kumulatif}}{100} \times 100 \\
 &= \frac{375,731}{100} \times 100 \\
 &= 3,76
 \end{aligned}$$

Cara perhitungan pada tiap ukuran ayakan diterapkan dengan prosedur yang seragam. Selisih antara berat awal dan total berat hasil pengujian umumnya terjadi akibat adanya kehilangan material, misalnya butiran pasir yang tertahan di saringan atau yang tercecet selama proses pengujian

berlangsung. Rekapitulasi hasil pemeriksaan perhitungan gradasi pasir dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Hasil Pemeriksaan Gradasi Pasir

Saringan		Berat Tertahan	Persentase Berat Tertahan	Persentase Tertahan Kumulatif	Persentase Lolos
mm	Inci	Gram (a)	% (b) = (a) / W	% (c)	% (d) = 100 - c
4.75	No. 4	24,5	4,939	4,939	95,061
2.36	No. 8	51,9	10,462	15,400	84,600
1.18	No. 16	102,5	20,661	36,061	63,939
0.60	No. 30	76,2	15,360	51,421	48,579
0.30	No. 50	119,3	24,048	75,469	24,531
0.15	No. 100	84,2	16,972	92,441	7,559
0.075	No. 200	37,5	7,559	100,000	0,000
Total (W)		496,1	100	375,731	

Mengacu pada Tabel 4.13, analisis terhadap gradasi pasir menghasilkan nilai modulus kehalusan mencapai 3,76. Angka tersebut masih dalam batas yang diatur pada SNI 03-1750-1990, yang berkisar antara 1,5-3,8. Dengan demikian, karakteristik gradasi pasir yang diuji dapat dinilai telah sesuai dengan persyaratan yang berlaku.

c. Berat Jenis Pasir

Pengujian berat jenis dilakukan sebagai dasar dalam menyusun perencanaan komposisi campuran (*mix design*) pada pembuatan roster. Data dari pengujian ini digunakan untuk menentukan perbandingan antar bahan secara lebih tepat, sehingga baik material utama maupun bahan substitusi dapat tercampur secara optimal. Dengan demikian, perhitungan kebutuhan volume tiap material dalam campuran dapat disesuaikan dengan spesifikasi yang telah direncanakan. Hasil pengujian berat jenis pada pasir sebagai dasar perhitungan proporsi campuran dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Pasir

Pengujian	A (gr)	B (gr)	Rata – Rata (gr)
Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD)	500	500	500
Berat benda uji kering oven (BK)	493,5	495,2	494,35
Berat picnometer diisi air 25° C (B)	657,4	658,5	657,95
Berat picnometer + benda uji SSD + Air 25° C (Bt)	956,9	955,9	956,4

Berdasarkan data pemeriksaan pada Tabel 4.14, dapat dihitung berat jenis (*bulk*), berat jenis permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu (*apparent*), dan kadar penyerapan (*absorption*) dengan persamaan 5, 6, 7, dan 8. Selanjutnya dilakukan perbandingan antara kode sampel A dan B untuk mengetahui nilai angka rata-rata yang didapatkan untuk penyesuaian standar atau mutu yang diinginkan seperti pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 Rekapitulasi Perhitungan Berat Jenis Pasir

Pengujian		A (gr)	B (gr)	Rata – Rata (gr)
Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD)	(SSD)	500	500	500
Berat benda uji kering oven	(BK)	493,5	495,2	494,35
Berat picnometer diisi air 25° C	(B)	657,4	658,5	657,95
Berat picnometer + benda uji SSD + Air 25°C	(Bt)	956,9	955,9	956,4
Perhitungan		A	B	Rata - Rata
Berat jenis (Bulk)	$\frac{BK}{(B + 500 - Bt)}$	2,461	2,444	2,453 gr/cm ³
Berat jenis permukaan jenuh (SSD)	$\frac{500}{(B + 500 - Bt)}$	2,494	2,468	2,481 gr/cm ³
Berat jenis semu (<i>Apparent</i>)	$\frac{BK}{(B + BK - Bt)}$	2,544	2,503	2,524 gr/cm ³
Penyerapan (<i>Absorbtion</i>)	$\frac{(500 - BK)}{BK} \times 100\%$	1,317	0,969	1,143%

Mengacu pada Tabel 4.15, analisis hasilnya menyatakan bahwa berat jenis pasir sebesar 2453 gr/cm³. Nilai ini masih termasuk dalam kisaran yang diperbolehkan menurut SNI 1970:2008, di mana berat jenis pasir umumnya berada sekitar 1,6 hingga 3,3. Dengan demikian, karakteristik pasir tersebut dapat dinilai sesuai dengan persyaratan standar dan layak digunakan sebagai material penyusun campuran roster.

4.1.3 Abu Sekam Padi

Analisis berat jenis terhadap abu sekam padi dilakukan sebagai salah satu parameter dalam perencanaan proporsi kebutuhan material pada campuran roster. Data ini berperan penting untuk memastikan ketepatan perhitungan volume bahan tambah sehingga dapat tercapai *homogenitas* campuran yang diinginkan.

Pengujian berat jenis abu sekam padi dilakukan dengan dua sampel sebagai perbandingan. Hasil pengujian tersebut disajikan pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Abu Sekam Padi

PENGUJIAN		A	B	Rata - Rata
Berat benda uji kering permukaan jenuh	(SSD)	120	120	120
Berat benda uji kering oven	(BK)	68,3	74,3	66,3
Berat picnometer diisi air 25° C	(B)	660	659,5	659,75
Berat picnometer + benda uji SSD + Air 25°C	(Bt)	693,6	689,2	691,40

Berdasarkan data pemeriksaan pada Tabel 4.16, dapat dihitung berat jenis (*bulk*), berat jenis permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu (*apparent*), dan kadar penyerapan (*absorbtion*) dengan persamaan 9, 10, 11, dan 12. Selanjutnya dilakukan perbandingan antara kode sampel A dan B untuk mengetahui nilai angka rata-rata yang didapatkan untuk penyesuaian standar atau mutu yang diinginkan seperti pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Rekapitulasi Perhitungan Berat Jenis Abu Sekam Padi

Pengujian		A	B	Rata - Rata
Berat benda uji kering permukaan jenuh	(SSD)	120	120	120 gr
Berat benda uji kering oven	(BK)	68,3	74,3	66,3 gr
Berat picnometer diisi air 25° C	(B)	660	659,5	659,75 gr
Berat picnometer + benda uji SSD + Air 25°C	(Bt)	693,6	689,2	691,40 gr
Perhitungan		A	B	Rata - Rata
Berat jenis (Bulk)	$\frac{BK}{(B + 120 - Bt)}$	0,791	0,823	0,807 gr/cm ³
Berat jenis permukaan jenuh (SSD)	$\frac{120}{(B + 120 - Bt)}$	1,389	1,329	1,359 gr/cm ³
Berat jenis semu (<i>Apparent</i>)	$\frac{BK}{(B + BK - Bt)}$	1,968	1,660	1,817 gr/cm ³

Perhitungan		A	B	Rata - Rata
Penyerapan (<i>Absorbtion</i>)	$\frac{(120 - BK)}{BK} \times 100\%$	75,695	61,507	68,601%

Berdasarkan Tabel 4.17 dapat disimpulkan bahwa hasil pengujian berat jenis abu sekam padi sebesar 0,807 gr/cm³ (*bulk*) dan 1,817 gr/cm³ (*apparent*). Nilai tersebut lebih rendah dibanding semen portland sehingga abu sekam padi tergolong material ringan yang berpotensi menurunkan berat volume mortar. Pada penelitian ini, abu sekam padi dipilih sebagai substitusi parsial semen pada campuran mortar roster beton sesuai fungsi kimia dan karakteristik pozolaniknya dengan kandungan *silika amorf* (SiO₂) yang tinggi, sehingga substitusi abu sekam padi tidak didasarkan pada kesamaan berat jenis. Hal tersebut juga mengacu pada konsep *Supplementary Cementitious Material* (SCM) sebagai pelengkap fungsi semen dan pengganti sebagian semen Portland.

Sedangkan dari sisi penyerapan air, didapatkan nilai sebesar 68,601%. Hal itu menunjukkan abu sekam padi memiliki porositas tinggi sehingga campuran mortar pada roster memerlukan penyesuaian kadar air.

4.1.4 Limbah Serbuk Kaca

Adapun material yang digunakan untuk substitusi sebagian pasir dalam pembuatan roster yaitu limbah serbuk kaca. Serbuk kaca yang telah disaring dengan gradasi yang selaras dengan gradasi pasir, diuji berat jenisnya. Data berat jenis tersebut berperan penting untuk memastikan ketepatan perhitungan volume bahan tambah sehingga dapat tercapai homogenitas campuran yang diinginkan. Hasil pengujian berat jenis serbuk kaca disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 18 Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Limbah Serbuk Kaca

PENGUJIAN		A	B	Rata - Rata
Berat benda uji kering permukaan jenuh	(SSD)	500	500	500
Berat benda uji kering oven	(BK)	498,6	496,5	497,55
Berat picnometer diisi air 25° C	(B)	658,7	659,6	659,15
Berat picnometer + benda uji SSD + Air 25°C	(Bt)	993,6	943	968,3

Berdasarkan data pemeriksaan pada Tabel 4.18, dapat dihitung berat jenis (*bulk*), berat jenis permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu (*apparent*), dan kadar

penyerapan (*absorbtion*) dengan persamaan 13, 14, 15, dan 16. Selanjutnya dilakukan perbandingan antara kode sampel A dan B untuk mengetahui nilai angka rata-rata yang didapatkan untuk penyesuaian standar atau mutu yang diinginkan seperti pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19 Rekapitulasi Perhitungan Berat Jenis Serbuk Kaca

Pengujian	A	B	Rata – Rata (gr)
Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD)	500	500	500
Berat benda uji kering oven (BK)	498,6	496,5	497,55
Berat picnometer diisi air 25° C (B)	658,7	659,6	659,15
Berat picnometer + benda uji SSD + Air 25°C (Bt)	993,6	943	968,3
Perhitungan	A	B	Rata - Rata
Berat jenis (Bulk) $\frac{BK}{(B + 500 - Bt)}$	3,020	2,292	2,656 gr/cm ³
Berat jenis permukaan jenuh (SSD) $\frac{500}{(B + 500 - Bt)}$	3,028	2,308	2,668 gr/cm ³
Berat jenis semu (<i>Apparent</i>) $\frac{BK}{(B + BK - Bt)}$	3,045	2,330	2,688 gr/cm ³
Penyerapan (<i>Absorbtion</i>) $\frac{(500 - BK)}{BK} \times 100\%$	0,281	0,705	0,493%

Berdasarkan Tabel 4.19 dapat disimpulkan terkait analisis hasil pengujian berat jenis limbah serbuk kaca bernilai 2,656 gr/cm³. Nilai tersebut berada dalam rentang 1,5-3,8 dan tidak terlalu jauh dari berat jenis pasir sehingga telah memenuhi kisaran berat jenis sebagai substitusi sebagian pasir yang sesuai dengan SNI 1970:2008. Dengan demikian, limbah serbuk kaca sebagai substitusi parsial terhadap pasir dalam pembuatan roster dapat dinyatakan layak digunakan karena memiliki berat jenis yang sesuai dengan standar yang berlaku.

4.2 Analisis Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan abu sekam padi dan serbuk kaca sebagai bahan substitusi parsial terhadap karakteristik fisik mortar, khususnya dalam menentukan tingkat kepadatan material. Nilai berat jenis digunakan sebagai parameter penting karena mencerminkan kerapatan struktur internal mortar yang berhubungan dengan kekuatan dan daya tahan material. Perhitungan berat jenis dilakukan berdasarkan perbandingan antara massa dan volume benda uji dengan persamaan 17. Volume kubus dihitung sebagai berikut:

$$V = 5 \times 5 \times 5 = 125 \text{ cm}^3$$

Rekapitulasi sampel benda uji yang telah dilakukan pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Hasil Pengujian Berat Jenis

Variasi	Kode Sampel	Umur (Hari)	Berat Kering Oven (gr/cm ³)	Berat Jenis (gr/cm ³)	Rata-Rata Berat Jenis (gr/cm ³)
A	P0;K0-1	14	251,5	2,012	2,041
	P0;K0-2	14	254,4	2,035	
	P0;K0-3	14	259,3	2,074	
B	P5;K5-1	14	234,7	1,878	1,930
	P5;K5-2	14	238,5	1,908	
	P5;K5-3	14	250,7	2,006	
C	P10;K7,5-1	14	227,9	1,823	1,839
	P10;K7,5-2	14	236,0	1,888	
	P10;K7,5-3	14	225,8	1,806	
D	P12,5;K10-1	14	212,3	1,698	1,713
	P12,5;K10-2	14	216,5	1,732	
	P12,5;K10-3	14	213,4	1,707	

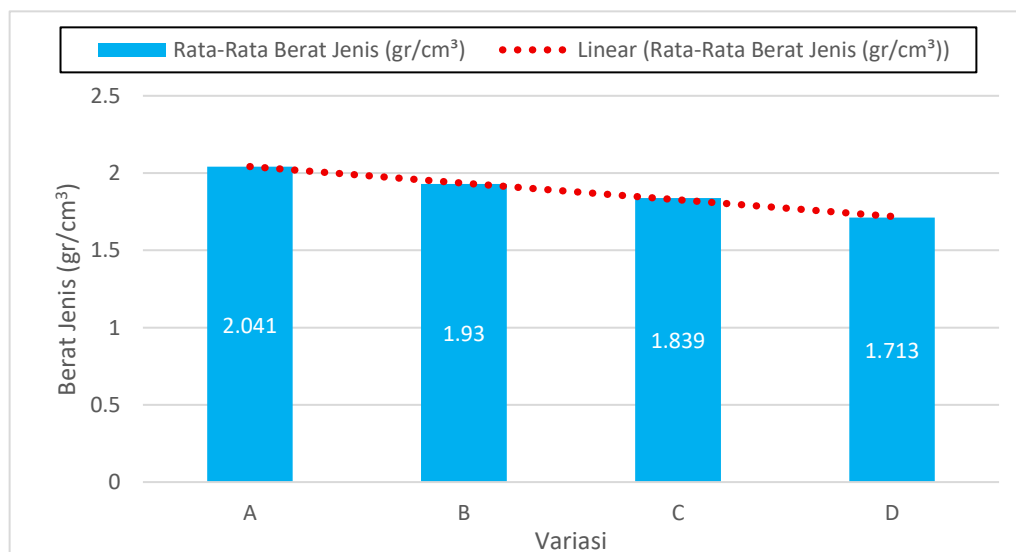
Berdasarkan Tabel 4.20 tentang hasil pengujian berat jenis pada umur 14 hari, diketahui bahwa variasi A yang digunakan sebagai kubus konvensional menghasilkan berat jenis rata-rata sebesar 2,041 gr/cm³. Nilai tersebut merupakan hasil rata-rata dari tiga benda uji, masing-masing sebesar 2,012 gr/cm³, 2,035 gr/cm³, dan 2,074 gr/cm³. Pada variasi dengan penambahan abu sekam padi dan limbah serbuk kaca sebagai bahan substitusi, yaitu B, C, dan D, diperoleh hasil yang bervariasi. Variasi B menunjukkan berat jenis rata-rata sebesar 1,930 gr/cm³, dengan nilai masing-masing sampel sebesar 1,878 gr/cm³, 1,908 gr/cm³, dan 2,006 gr/cm³. Selanjutnya, pada variasi C terjadi penurunan nilai berat jenis dengan rata-

rata sebesar $1,839 \text{ gr/cm}^3$, yang diperoleh dari hasil pengujian $1,823 \text{ gr/cm}^3$, $1,888 \text{ gr/cm}^3$, dan $1,806 \text{ gr/cm}^3$. Selanjutnya, pada variasi D terjadi penurunan nilai berat jenis dengan rata-rata sebesar $1,713 \text{ gr/cm}^3$, yang diperoleh dari hasil pengujian $1,698 \text{ gr/cm}^3$, $1,732 \text{ gr/cm}^3$, dan $1,707 \text{ gr/cm}^3$. Adapun nilai berat jenis optimum dalam penelitian ini diperoleh pada variasi A, dengan nilai sebesar $2,041 \text{ gr/cm}^3$. Sedangkan nilai berat jenis terendah diperoleh pada variasi D, dengan nilai sebesar $1,713 \text{ gr/cm}^3$.

Berat jenis mortar tersebut dihitung dengan persamaan 17 dan menghasilkan rata-rata berat jenis yang tersaji pada Tabel 4.21.

Tabel 4. 21 Rekapitulasi Pengujian Berat Jenis

Variasi	Umur (Hari)	Rata-Rata Berat Jenis (gr/cm^3)
A	14	2,041
B	14	1,930
C	14	1,839
D	14	1,713



Grafik 4. 1 Rata-Rata Berat Jenis (gr/cm^3)

Data yang tersaji pada Tabel 4.21 dan Grafik 4.1 menunjukkan bahwa nilai berat jenis mortar cenderung menurun seiring penambahan bahan abu sekam padi dan serbuk kaca pada campuran mortar. Penurunan berat jenis ini mengindikasikan bahwa mortar menjadi lebih ringan dan memiliki rongga lebih besar dibanding mortar normal tanpa bahan substitusi apapun. Dengan demikian, variasi A sebagai campuran normal menghasilkan mortar paling padat, sedangkan variasi D yang

memiliki bahan substitusi berupa 12,5% abu sekam padi dan 10% limbah serbuk kaca menghasilkan mortar paling ringan pada umur pengujian 14 hari.

4.3 Analisis Pengujian Daya Serap Air

Pengujian daya serap air dilaksanakan untuk mengevaluasi kapasitas roster dalam menyerap air sebagai indikator tingkat porositas dan kepadatan material. Nilai daya serap air digunakan untuk menilai kualitas roster, dimana semakin besar nilai yang diperoleh menunjukkan bahwa material memiliki pori-pori yang lebih besar sehingga berpotensi menurunkan ketahanan dan keawetan. Pengujian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan bahan substitusi, seperti abu sekam padi dan serbuk kaca, terhadap sifat fisik roster.

Nilai daya serap air dihitung berdasarkan perbandingan selisih berat basah dan berat kering terhadap berat kering, mengacu pada SNI 03-0349-1989. Dengan perolehan data yang ditetapkan rincian perhitungan dijabarkan dengan persamaan 18.

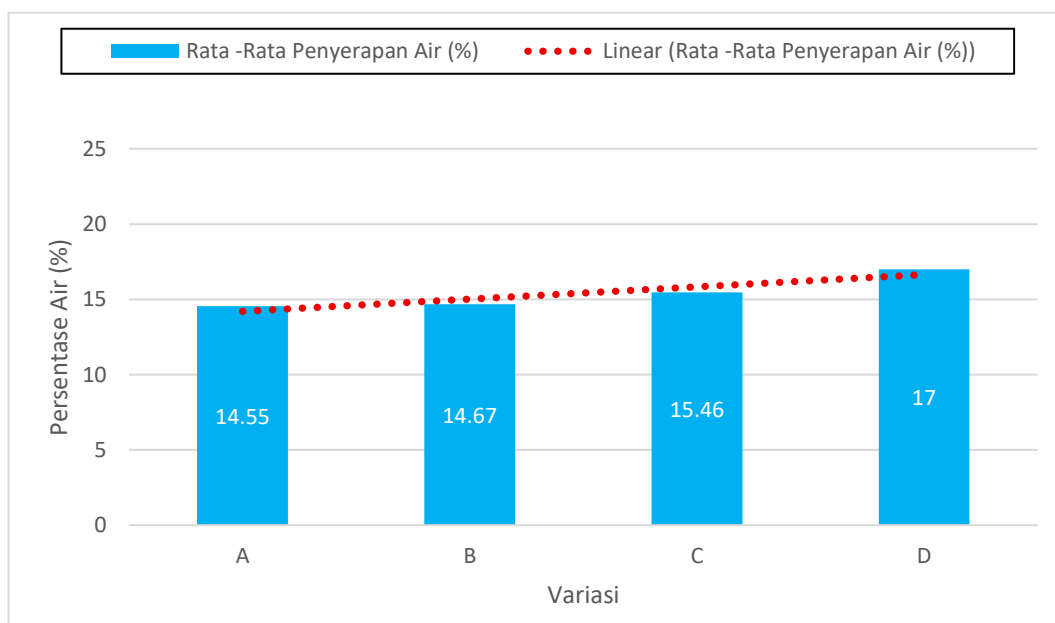
Tabel 4. 22 Hasil Pengujian Berat Roster pada Daya Serap Air

Variasi	Kode Sampel	Berat Basah (A) (gram)	Berat Kering (B) (gram)
A	P0;K0-R1	4645	4000
	P0;K0-R2	4680	4125
	P0;K0-R3	5105	4475
B	P5;K5-R1	5000	4390
	P5;K5-R2	4645	3990
	P5;K5-R3	5395	4745
C	P10;K7,5-R1	4715	4190
	P10;K7,5-R2	4575	3895
	P10;K7,5-R3	5150	4425
D	P12,5;K10-R1	5030	4265
	P12,5;K10-R2	4940	4185
	P12,5;K10-R3	4860	4225

Berdasarkan data dari Tabel 4.22, dapat dihitung daya serap air dari setiap benda uji pada empat variasi campuran roster mortar dengan persamaan 18 yang kemudian direkap pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Hasil Pengujian Daya Serap Air Pada Roster

Variasi	Kode Sampel	Berat Basah (A) (gram)	Berat Kering (B) (gram)	Hasil Penyerapan Air (%)	Rata-Rata Penyerapan Air (%)	Keterangan (Memenuhi/Tidak Memenuhi)
A	P0;K0-R1	4645	4000	16,13	14,55	Memenuhi
	P0;K0-R2	4680	4125	13,45		
	P0;K0-R3	5105	4475	14,08		
B	P5;K5-R1	5000	4390	13,90	14,67	Memenuhi
	P5;K5-R2	4645	3990	16,42		
	P5;K5-R3	5395	4745	13,70		
C	P10;K7,5-R1	4715	4190	12,53	15,46	Memenuhi
	P10;K7,5-R2	4575	3895	17,46		
	P10;K7,5-R3	5150	4425	16,38		
D	P12,5;K10-R1	5030	4265	17,94	17,00	Memenuhi
	P12,5;K10-R2	4940	4185	18,04		
	P12,5;K10-R3	4860	4225	15,03		



Grafik 4. 2 Rata-Rata Hasil Pengujian Daya Serap Air

Berdasarkan hasil pengolahan data pada Tabel 4.23 Grafik 4.2 rata-rata daya serap air roster dengan dimensi $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, seluruh variasi campuran menunjukkan nilai penyerapan air yang tergolong rendah dan masih memenuhi batas persyaratan yang ditetapkan. Roster atau disebut dengan kode sampel P0;K0 tanpa penambahan abu sekam padi dan serbuk kaca variasi A memiliki nilai rata-rata daya serap sebesar 14,55%. Sementara itu, pada variasi dengan penambahan

abu sekam padi dan serbuk kaca diperoleh nilai sebesar 14,67% untuk variasi B; 15,46% untuk variasi C; dan 17% untuk variasi D.

Peningkatan daya serap air tersebut menunjukkan bahwa penambahan abu sekam padi dan serbuk kaca memengaruhi tingkat porositas roster. Semakin tinggi variasi penambahan bahan, maka rongga atau pori-pori di dalam mortar roster cenderung semakin banyak sehingga kemampuan menyerap air meningkat. Hal ini berbanding terbalik dengan hasil penelitian Kondorura et al. (2025) yang menunjukkan bahwa tingginya persentase abu sekam padi akan menghasilkan nilai daya serapnya yang rendah. Kondisi tersebut dapat terjadi dikarenakan bahan substitusi pasir, yaitu serbuk kaca seperti yang tertera pada penelitian Syafi'urroziq, et al. (2018) bahwa seiring meningkatnya persentase serbuk kaca yang otomatis akan menambah volumenya, semakin tinggi pula penyerapan air yang dihasilkan oleh mortar.

Meskipun demikian, seluruh variasi tetap sesuai dengan standar kapasitas daya serap air yang ditentukan pada SNI 03-0349-1989 yaitu $< 25\%$, sehingga roster yang dihasilkan masih tergolong layak digunakan. Variasi A menghasilkan roster dengan struktur paling padat karena memiliki daya serap air paling kecil, sedangkan variasi D memiliki tingkat porositas paling tinggi yang ditunjukkan oleh nilai daya serap air terbesar.

4.4 Analisis Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilaksanakan pada sampel di lingkungan Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur Universitas Diponegoro dengan memanfaatkan alat uji tekan (*Compression Testing Machine/CTM*).

Selama proses pengujian, digunakan tiga benda uji untuk setiap variasi campuran sebagai representasi, sehingga diperoleh nilai rata-rata kuat tekan yang lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan. Parameter utama yang dihasilkan berupa beban maksimum yang mampu ditahan oleh sampel, kemudian dikonversi menjadi nilai kuat tekan dalam satuan Megapascal (MPa) sebagai acuan mutu mortar. Seluruh hasil pengujian selanjutnya disajikan secara sistematis dalam bentuk tabel untuk memudahkan analisis yang dihitung dengan persamaan 19 dapat dilihat pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24 Hasil Pengujian Kuat Tekan Kubus 5x5x5 cm Umur 28 Hari

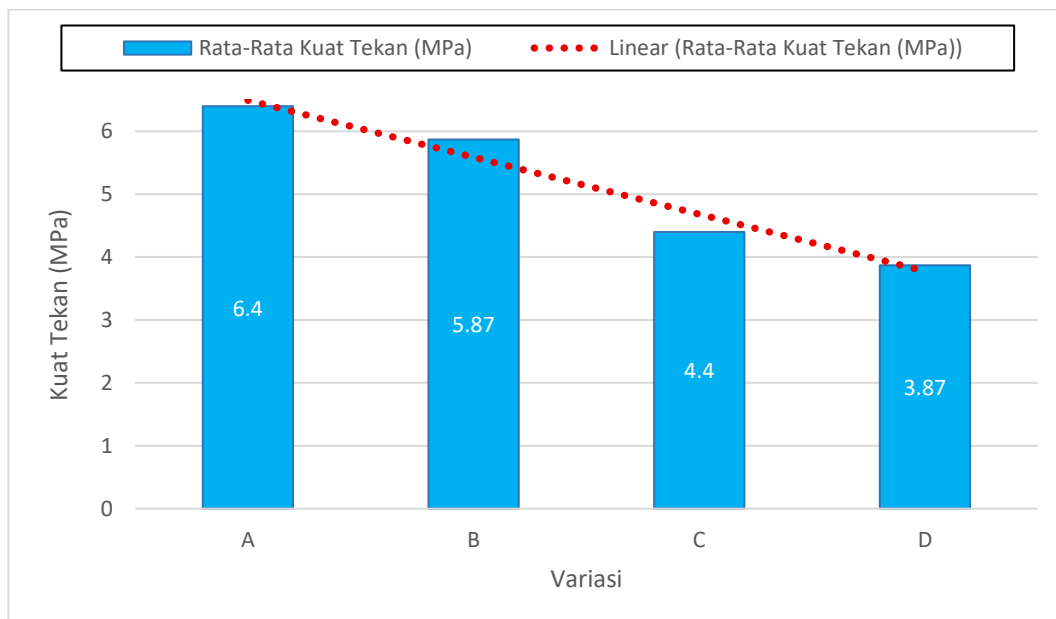
Variasi	Kode Sampel	Umur (Hari)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum (N)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-Rata Kuat Tekan (MPa)
A	P0;K0-1	28	2500	17000	6,80	6,40
	P0;K0-2	28	2500	16000	6,40	
	P0;K0-3	28	2500	15000	6,00	
B	P5;K5-1	28	2500	14000	5,60	5,87
	P5;K5-2	28	2500	14000	5,60	
	P5;K5-3	28	2500	16000	6,40	
C	P10;K7,5-1	28	2500	10000	4,00	4,40
	P10;K7,5-2	28	2500	12000	4,80	
	P10;K7,5-3	28	2500	11000	4,40	
D	P12,5;K10-1	28	2500	10000	4,00	3,87
	P12,5;K10-2	28	2500	10000	4,00	
	P12,5;K10-3	28	2500	9000	3,60	

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan pada umur 28 hari yang tertera pada Tabel 4.24, variasi A yang digunakan sebagai kubus konvensional menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 6,40 MPa. Nilai tersebut merupakan hasil rata-rata dari tiga benda uji, masing-masing sebesar 6,8 MPa, 6,4 MPa, dan 6 MPa. Pada variasi dengan penambahan abu sekam padi dan limbah serbuk kaca sebagai bahan substitusi, yaitu B, C, dan D, diperoleh hasil yang bervariasi. Variasi B menunjukkan kuat tekan rata-rata sebesar 6,4 MPa, dengan nilai masing-masing sampel sebesar 5,6 MPa, 5,6 MPa, dan 6,4 MPa. Selanjutnya, pada variasi C terjadi peningkatan nilai kuat tekan dengan rata-rata sebesar 4,4 MPa, yang diperoleh dari hasil pengujian 4 MPa, 4,8 MPa, dan 4,4 MPa. Adapun nilai kuat tekan optimum dalam penelitian ini diperoleh pada variasi A, dengan nilai rata-rata sebesar 6,4 MPa

Berikut merupakan rekap hasil kekuatan tekan sampel kubus usia 28 hari yang tersaji pada Tabel 4.25.

Tabel 4. 25 Rekapitulasi Hasil Kuat Tekan Umur 28 Hari

Variasi	Umur (Hari)	Rata-Rata Kuat Tekan (MPa)	SNI 03-0349-1989 (Memenuhi/Tidak Memenuhi)	Rencana Kuat Tekan > 5 MPa (Memenuhi/Tidak Memenuhi)
A	28	6,40	Memenuhi	Memenuhi
B	28	5,87	Memenuhi	Memenuhi
C	28	4,40	Memenuhi	Tidak Memenuhi
D	28	3,87	Memenuhi	Tidak Memenuhi



Grafik 4. 3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Kubus

Berdasarkan Tabel 4.25 dan Grafik 4.3 tentang rekapitulasi hasil kuat tekan benda uji kubus pada umur 28 hari, didapatkan bahwa seluruh variasi telah memenuhi persyaratan SNI 03-0349-1989 dengan syarat kuat tekan rata-rata minimum untuk dinding ringan/ventilasi ≥ 2 MPa. Nilai rata-rata kuat tekan tertinggi terdapat pada variasi A sebesar 6,40 MPa, diikuti variasi B sebesar 5,87 MPa, variasi C sebesar 4,40 MPa, dan variasi D sebesar 3,87 MPa. Namun, tidak semua variasi memenuhi kuat tekan rencana yaitu > 5 MPa.

Pada penelitian ini terjadi penurunan kuat tekan seiring bertambahnya bahan substitusi yaitu dengan nilai sebesar 5,87 MPa, 4,4 MPa dan 3,87 MPa. Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan bahan substitusi abu sekam padi dan serbuk kaca dapat mengurangi kepadatan mortar dan memperbesar pori-pori campuran sehingga kekuatan tekan menurun. Hal serupa juga terjadi pada penelitian Jamaaluddin dan Jafar (2023). Pada penelitian tersebut, seiring bertambahnya persentase serbuk kaca pada campurannya berpengaruh pada penurunan kuat tekan beton. Penelitian oleh Iskandar et. al (2024) juga menunjukkan bahwa kuat tekan cenderung menurun terhadap penggunaan abu sekam padi dan serbuk kaca sebagai bahan substitusi.

Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa kombinasi penggunaan abu sekam padi dan serbuk kaca dianggap kurang cocok sebagai bahan substitusi semen dan pasir sehingga kekuatan beton terus menurun setiap persentase penambahan bahan tersebut.

4.5 Analisis Biaya

Analisis biaya dilakukan untuk mengidentifikasi serta membandingkan tingkat keekonomisan antara roster konvensional dan roster inovatif yang menggunakan substitusi parsial abu sekam padi pada semen dan limbah serbuk kaca sebagai substitusi parsial pada pasir. Perhitungan biaya dalam penelitian ini difokuskan pada komponen material, tanpa mempertimbangkan biaya tenaga kerja, operasional, maupun biaya pendukung lainnya seperti transportasi dan peralatan produksi.

Tujuan dari analisis ini adalah untuk menilai efisiensi biaya produksi pada setiap variasi campuran yang digunakan. Berikut merupakan harga satuan bahan terlihat pada Tabel 4.26.

Tabel 4. 26 Harga Satuan Bahan

Bahan	Satuan	Harga
Pasir Pasang	Kg	Rp233,00
Semen PPC Rajawali	Kg	Rp1.150,00
Abu Sekam Padi	Kg	Rp300,00
Serbuk Kaca	Kg	Rp400,00

Bahan/material yang ditunjukkan pada Tabel 4.26 didapatkan berdasarkan harga pasaran. Pasir pasang dihitung dari harga per m³ dengan nilai Rp350.000,00, sehingga bila 1 m³ sama dengan 1.500 kg, maka harga pasir pasang per kg yaitu Rp233,00. Semen PPC yang digunakan yaitu bermerk Rajawali dengan harga Rp46.000 per sak pada toko bangunan, sehingga harga semen tersebut per kg yaitu Rp1.150,00. Abu sekam padi dibeli dengan harga untuk bahan baku industri yaitu Rp300,00 per kg. Untuk harga serbuk kaca dari hasil olahan limbah didapatkan Rp400 untuk harga per kg.

Selanjutnya, kebutuhan material dan perhitungan biaya roster pada masing-masing variasi disesuaikan dengan harga bahan beli yang disajikan pada bagian berikut.

a. Variasi A

Pada variasi A dikategorikan sebagai roster konvensional dengan penggunaan proporsi material semen sebesar 1, pasir 4 dan air 0,5. Analisa biaya untuk pembuatan roster variasi A ditunjukkan pada Tabel 4.27, yaitu sebagai berikut.

Tabel 4. 27 Total Biaya Roster Variasi A

No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir Pasang	4,224	Kg	Rp233,33	Rp985,6,00
2.	Semen PPC Rajawali	1,056	kg	Rp1.150,00	Rp1.214,40
Total Biaya / Roster					Rp 2.200,00
Total Biaya / 1m ² (25 Roster)					Rp 55.000,00

Analisa biaya produksi untuk roster variasi A adalah sebesar Rp 2.200,00 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.27. Untuk aplikasi dalam skala luas, roster variasi A per 1 m² membutuhkan 25 roster dengan biayanya adalah sebesar Rp 55.000,00.

b. Variasi B

Pada variasi B dikategorikan sebagai roster non konvensional yang menggunakan komposisi substitusi parsial semen berupa 5% abu sekam padi dan substitusi parsial pasir berupa 5% serbuk kaca dan faktor air semen sebesar 0,5 dengan koreksi air berdasarkan faktor penyerapan air pada tiap materialnya. Estimasi biaya yang dikeluarkan untuk pembuatan roster variasi B dirinci pada Tabel 4.28, yaitu sebagai berikut.

Tabel 4. 28 Total Biaya Roster Variasi B

No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir Pasang	4,013	kg	Rp233,33	Rp936,32
2.	Semen PPC Rajawali	1,003	kg	Rp1.150,00	Rp1.153,68
3.	Abu Sekam Padi	0,053	kg	Rp300,00	Rp15,84
4.	Serbuk Kaca	0,211	kg	Rp400,00	Rp 84,48
Total Biaya / Roster					Rp 2.190,32
Total Biaya / 1m ²					Rp 54.758,00

Analisa biaya produksi untuk roster variasi B adalah sebesar Rp2.190,32 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.28. Untuk aplikasi dalam skala luas, roster variasi B per 1 m² membutuhkan 25 roster dengan biayanya adalah sebesar Rp54.758,00.

c. Variasi C

Pada variasi C dikategorikan sebagai roster non konvensional yang menggunakan komposisi substitusi parsial semen berupa 10% abu sekam padi dan substitusi parsial pasir berupa 7,5% serbuk kaca dan faktor air semen sebesar 0,5 dengan koreksi air berdasarkan faktor penyerapan air pada tiap materialnya. Estimasi biaya yang dikeluarkan untuk pembuatan roster variasi B dirinci ditunjukkan pada Tabel 4.29, yaitu sebagai berikut.

Tabel 4. 29 Total Biaya Roster Variasi C

No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir Pasang	3,907	kg	Rp233,33	Rp911,68
2.	Semen PPC Rajawali	0,950	kg	Rp1.150,00	Rp1.092,96
3.	Abu Sekam Padi	0,106	kg	Rp300,00	Rp 31,68
4.	Serbuk Kaca	0,317	kg	Rp400,00	Rp 126,72
Total Biaya / Roster					Rp 2.163,04
Total Biaya / 1m ²					Rp 54.076,00

Analisa biaya produksi untuk roster variasi C adalah sebesar Rp2.163,04 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.29. Untuk aplikasi dalam skala luas, roster variasi B per 1 m² membutuhkan 25 roster dengan biayanya adalah sebesar Rp54.076,00.

d. Variasi D

Pada variasi D dikategorikan sebagai roster non konvensional yang menggunakan komposisi substitusi parsial semen berupa 12,5% abu sekam padi dan substitusi parsial pasir berupa 10% serbuk kaca dan faktor air semen sebesar 0,5 dengan koreksi air berdasarkan faktor penyerapan air pada tiap materialnya. Estimasi biaya yang dikeluarkan untuk pembuatan roster variasi B dirinci ditunjukkan pada Tabel 4.30, yaitu sebagai berikut.

Tabel 4. 30 Total Biaya Roster Variasi D

No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir Pasang	3,0802	kg	Rp233,33	Rp887,04

No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
2.	Semen PPC Rajawali	0,924	kg	Rp1.150,00	Rp1.062,60
3.	Abu Sekam Padi	0,132	kg	Rp300,00	Rp 39,6
4.	Serbuk Kaca	0,422	kg	Rp400,00	Rp 168,96
Total Biaya / Roster					Rp 2.158,20
Total Biaya / 1m ²					Rp 53.955,00

Analisa biaya produksi untuk roster variasi D adalah sebesar Rp2.158,20 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.30. Untuk aplikasi dalam skala luas, roster variasi B per 1 m² membutuhkan 25 roster dengan biayanya adalah sebesar Rp53.955,00.

Berdasarkan rincian analisis biaya pada keempat variasi roster, dapat diketahui selisih harga tiap variasi yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Variasi A} &= \text{Rp}2.200,00 \\ \text{Variasi B} &= \text{Rp}2.190,32 - \text{Rp}2.200,00 \\ &= -\text{Rp}9,86 \\ \text{Variasi D} &= \text{Rp}2.163,04 - \text{Rp}2.190,32 \\ &= -\text{Rp}27,28 \\ \text{Variasi B} &= \text{Rp}2.158,20 - \text{Rp}2.163,04 \\ &= -\text{Rp}4,84 \end{aligned}$$

Dari selisih harga tiap variasi, dapat dihitung persentase kenaikan harga dari roster konvensional, yaitu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Variasi A} &= \text{Rp}2.200,00 \\ \text{Variasi B} &= \frac{-\text{Rp}9,68}{\text{Rp}2.200,00} \times 100 \\ &= -0,44\% \\ \text{Variasi C} &= \frac{-\text{Rp}27,28}{\text{Rp}2.200,00} \times 100 \\ &= -1,24\% \\ \text{Variasi D} &= \frac{-\text{Rp}4,84}{\text{Rp}2.200,00} \times 100 \\ &= -0,22\% \end{aligned}$$

Tabel 4. 31 Perhitungan Selisih Harga pada Roster

Variasi	Harga Roster	Selisih (Rp)	Selisih (%)
A	Rp2.200,00	-	-
B	Rp2.190,32	-Rp9,68	-0,44%
C	Rp2.163,04	-Rp27,28	-1,24%
D	Rp2.158,20	-Rp4,84	-0,22%

Berdasarkan Tabel 4.31, dapat diketahui bahwa variasi dengan penambahan abu sekam padi berpengaruh pada menurunnya harga produksi roster mortar. Variasi A sebagai campuran kontrol memiliki harga produksi sebesar Rp2.200,00 per unit. Sementara itu, variasi B, C, dan D menunjukkan perubahan harga produksi dengan selisih berturut-turut sebesar Rp9,68 (0,44%), Rp27,28 (1,24%), dan Rp4,84 (0,22%) dibandingkan variasi kontrol.

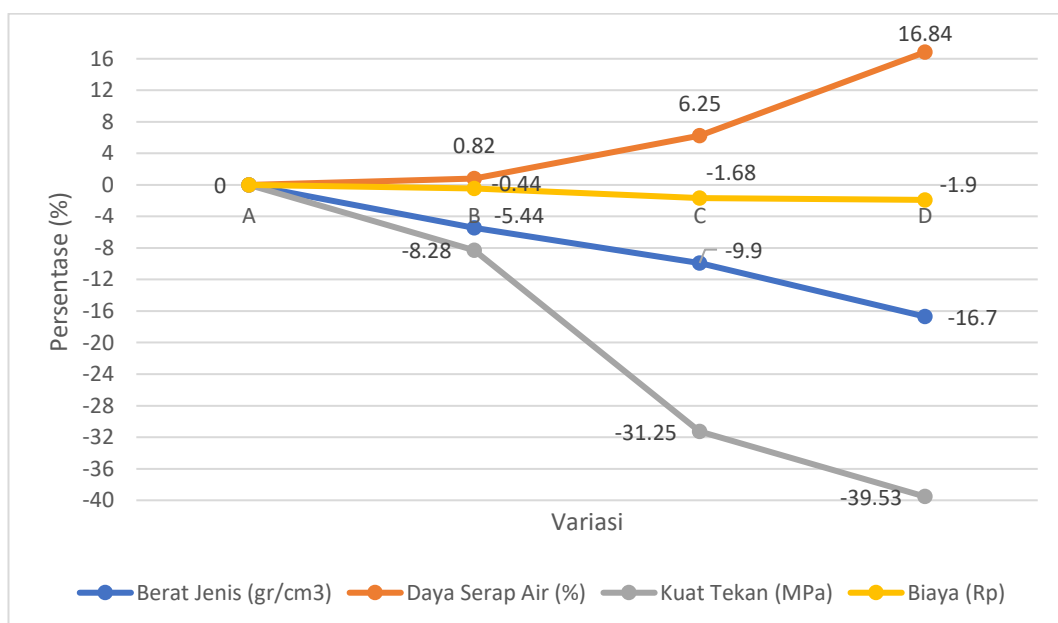
Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan abu sekam padi dan serbuk kaca sebagai bahan substitusi dapat diterapkan tanpa menyebabkan perubahan biaya produksi yang signifikan, sehingga berpotensi menjadi alternatif material yang ekonomis sekaligus memanfaatkan limbah pertanian dan rumah tangga.

4.6 Analisis Komparasi Antar Variasi

Data yang telah diperoleh pada analisis pengujian dan biaya kemudian disajikan dalam bentuk rekapitulasi guna mempermudah pemahaman dan analisis terhadap keseluruhan hasil penelitian. Melalui rekapitulasi yang tersaji, maka dapat dibandingkan variasi paling ekonomis dan memiliki kinerja terbaik berdasarkan parameter kuat tekan, daya serap air, serta biaya produksi. Perbandingan ini dilakukan untuk menentukan variasi campuran yang memberikan keseimbangan optimal antara aspek teknis dan aspek ekonomis. Hasil perbandingan antar variasi dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan komposisi campuran roster dengan penambahan abu sekam padi yang paling efektif untuk diterapkan dalam produksi. Adapun rekapitulasi persentase perbandingan (*comparison*) antar variasi disajikan sebagai berikut.

Tabel 4. 32 Rekapitulasi Persentase Perbandingan Antar Variasi

Pengujian (%)	Variasi			
	A – P0K0	B – P5K5	C – P10K7,5	D – P12,5K10
Berat Jenis	0	-5,44	-9,90	-16,07
Daya Serap Air (%)	0	0,82	6,25	16,84
Kuat Tekan (%)	0	-8,28	-31,25	-39,53
Biaya (%)	0	-0,44	-1,68	-1,90



Grafik 4. 4 Analisis Perbandingan Antar Variasi

Mengacu pada Tabel 4.32 dan Grafik 4.4, diketahui bahwa penambahan abu sekam padi dan serbuk kaca pada campuran roster memberikan dampak yang berbeda terhadap setiap parameter pengujian. Variasi A (P0K0) digunakan sebagai campuran kontrol dengan nilai persentase perubahan sebesar 0% pada seluruh parameter. Persentase perubahan pada variasi B, C, dan D dihitung terhadap variasi kontrol untuk mengetahui besarnya pengaruh penambahan material substitusi yang digunakan.

Pada parameter berat jenis, terjadi penurunan pada seluruh variasi campuran. Variasi B mengalami penurunan sebesar 5,44%, variasi C sebesar 9,90%, dan variasi D sebesar 16,07%. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar proporsi

abu sekam padi dan serbuk kaca yang digunakan, maka berat jenis roster cenderung semakin rendah. Penurunan berat jenis menunjukkan bahwa material menjadi lebih ringan dibandingkan roster normal.

Pada bagian parameter daya serap air, terjadi peningkatan pada seluruh variasi campuran. Variasi B mengalami peningkatan sebesar 0,82%, variasi C sebesar 6,25%, dan variasi D sebesar 16,84%. Peningkatan daya serap air menunjukkan bahwa penambahan abu sekam padi dan serbuk kaca menyebabkan bertambahnya pori-pori/rongga pada campuran sehingga kemampuan material dalam menyerap air menjadi lebih besar.

Kemudian untuk parameter kuat tekan, seluruh variasi mengalami penurunan dibandingkan variasi kontrol. Variasi B mengalami penurunan sebesar 8,28%, variasi C sebesar 31,25%, dan variasi D sebesar 39,53%. Penurunan terbesar terjadi pada variasi D, sedangkan penurunan terkecil terjadi pada variasi B. Hal ini menunjukkan bahwa ketika persentase bahan substitusi yang digunakan semakin besar, maka kekuatan tekan roster cenderung menurun.

Pada parameter biaya, seluruh variasi menunjukkan penurunan biaya dibandingkan variasi kontrol. Variasi B mengalami penurunan sebesar 0,44%, variasi C sebesar 1,68%, dan variasi D sebesar 1,90%. Meskipun persentase penurunan biaya relatif kecil, hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan abu sekam padi dan serbuk kaca dapat memberikan efisiensi biaya produksi roster.

Secara keseluruhan, variasi D menghasilkan biaya produksi terendah, namun juga mengalami penurunan kuat tekan yang paling besar. Sebaliknya, variasi B menunjukkan perubahan yang relatif kecil pada seluruh parameter, dengan penurunan kuat tekan hanya sebesar 8,28% dan pengurangan biaya sebesar 0,44%. Oleh karena itu, variasi B dapat dianggap sebagai variasi yang paling seimbang antara aspek teknis dan aspek ekonomis, sedangkan variasi D lebih unggul dari segi efisiensi biaya namun dengan konsekuensi penurunan kualitas mekanik yang lebih signifikan.

4.7 Hasil Penelitian

Hasil dari penelitian yang telah diperoleh pada analisis pengujian dan biaya kemudian disajikan dalam bentuk rekapitulasi guna mempermudah pemahaman

dan analisis terhadap keseluruhan hasil penelitian. Adapun rekapitulasi hasil pengujian disajikan sebagai berikut.

Tabel 4. 33 Rekapitulasi Hasil Penelitian

Pengujian	Variasi			
	A – P0K0	B – P5K5	C – P10K7,5	D – P12,5K10
Berat Jenis (gr/cm ³)	2,041	1,930	1,839	1,713
Daya Serap Air (%)	14,55	14,67	15,46	17,00
Kuat Tekan (MPa)	6,40	5,87	4,40	3,87
Biaya (Rp)	Rp2.200,00	Rp2.190,32	Rp2.163,04	Rp2.158,20

Berdasarkan Tabel 4.33 tentang Rekapitulasi Hasil Penelitian, dapat diketahui bahwa substitusi abu sekam terhadap semen dan substitusi limbah serbuk kaca terhadap agregat halus berpengaruh terhadap karakteristik roster mortar berupa berat jenis, daya serap air, kuat tekan, serta biaya produksi roster mortar. Nilai berat jenis berada dikisaran 1,713-2,041 gr/cm³, dengan nilai tertinggi pada campuran A-P0K0 sebesar 2,041 gr/cm³ dan terendah pada variasi D-P12,5K10 sebesar 1,713 gr/cm³. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase bahan tambahan yang digunakan, maka roster mortar yang dihasilkan menjadi lebih ringan. Penelitian Muliwati et al. (2025) juga menghasilkan kesimpulan yang serupa bahwa penggunaan tambahan serbuk kaca menunjukkan penurunan berat jenis pada mortar.

Nilai daya serap air mengalami peningkatan dari variasi A-P0K0 sebesar 14,55% menjadi 17% pada variasi D-P12,5K10. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa porositas mortar semakin besar sehingga kemampuan menyerap air meningkat. Hal tersebut didukung oleh hasil dari penelitian Syafi'urroziq, et al. (2018) bahwa seiring meningkatnya persentase serbuk kaca yang otomatis akan menambah volumenya, semakin besar pula penyerapan air yang dihasilkan oleh mortar. Mengacu pada SNI 03-0349-1989 tentang bata beton untuk pasangan dinding, besarnya daya serap air berkaitan dengan tingkat kepadatan mortar, dimana semakin tinggi penyerapan air maka material cenderung memiliki rongga lebih banyak. Namun, hasil dari pengujian daya serap air pada keempat variasi dinyatakan masih memenuhi standar SNI 03-0349-1989 yaitu < 25%.

Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa variasi A-P0K0 menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 6,40 MPa, sedangkan variasi D-P12,5K10 menghasilkan kuat tekan terendah sebesar 3,87 MPa. Meskipun kuat tekan pada variasi C – P10K7,5 dan D – P12,5K10 yaitu 4,40 MPa dan 3,87 MPa tidak sesuai dengan kuat rencana > 5 MPa, namun berdasarkan SNI 03-0349-1989, nilai kuat tekan tersebut masih termasuk kategori mutu rendah hingga sedang sehingga dapat dikatakan bahwa memenuhi syarat minimum sesuai dengan penggunaan untuk elemen non-struktural seperti roster atau ventilasi bangunan. Turunnya kekuatan tekan yang signifikan seiring dengan meningkatnya persentase abu sekam padi maupun limbah serbuk kaca juga terjadi pada penelitian Jamaaluddin & Jafar (2023), dimana seiring bertambahnya persentase serbuk kaca pada campurannya berpengaruh pada penurunan kuat tekan beton. Begitupula dengan penelitian Iskandar et. al (2024) menunjukkan bahwa kuat tekan cenderung menurun terhadap penggunaan abu sekam padi dan serbuk kaca sebagai bahan substitusi.

Dari segi biaya, penambahan variasi campuran menjadikan biaya produksi menurun dari Rp2.200,00 menjadi Rp2.158,20. Oleh karena itu, variasi B-P5K5 dapat dianggap sebagai variasi yang paling optimal karena menghasilkan kuat tekan tertinggi dengan peningkatan biaya yang masih relatif efisien dibandingkan variasi lainnya yaitu pada harga Rp2.190,32.

Secara menyeluruh, penelitian ini menghasilkan penjelasan bahwa penggunaan abu sekam padi sebagai substitusi semen dan limbah serbuk kaca sebagai substitusi agregat halus pada roster mortar masih mampu memenuhi syarat minimum kuat tekan berdasarkan SNI 03-0349-1989 untuk elemen non-struktural. Penambahan bahan campuran memberikan pengaruh terhadap penurunan berat jenis, peningkatan daya serap air, serta perubahan nilai kuat tekan mortar. Variasi B-P5K5 menjadi campuran yang paling ideal karena menghasilkan kuat tekan tertinggi dengan biaya produksi yang masih relatif efisien. Dengan demikian, penelitian ini dapat menjadi acuan dalam inovasi material roster yang lebih ringan, ekonomis, dan tetap memenuhi standar mutu untuk aplikasi konstruksi non-struktural.