

BAB IV

HASIL / PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil percobaan untuk mengembangkan proses pembuatan dengan inovatif menggunakan arang tempurung kelapa sebagai bahan substitusi. Data yang diperoleh untuk setiap varian sampel disajikan, dengan fokus pada evaluasi sifat, karakteristik fisik, dan sifat mekaniknya. Pengujian yang dilakukan meliputi pengukuran kuat tekan, penyerapan air, dan konsentrasi karbon dioksida, serta pengamatan fisik dan visual.

4.1 Analisis Pengujian Material

Tahap awal dalam penelitian ini adalah pengujian material dasar sebelum melangkah ke proses pembuatan sampel. Prosedur ini dilakukan untuk mengidentifikasi karakteristik fisis maupun kimia dari setiap bahan penyusun campuran roster. Dengan memahami tiap material, peneliti mengetahui bahwa formulasi yang digunakan memenuhi standar mutu dan mampu menghasilkan produk akhir yang optimal sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan.

4.1.1 Arang Tempurung Kelapa

Material substitusi yang diaplikasikan dalam penelitian ini adalah arang tempurung kelapa yang diperoleh melalui proses karbonisasi. Tahap preparasi dimulai dengan membersihkan arang dari sisa kotoran untuk menjamin kemurnian bahan.

Berat Jenis Arang Tempurung Kelapa

Analisis berat jenis terhadap arang tempurung kelapa dilakukan sebagai parameter dalam merencanakan proporsi kebutuhan material pada campuran roster. Data ini penting untuk memastikan akurasi volume bahan tambah guna mencapai homogenitas yang diinginkan. Hasil pengujian berat jenis arang tempurung kelapa tersebut secara disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Abu Tempurung Kelapa

No.	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1.	Berat Piknometer Kosong (W1)	gr	168
2.	Berat Piknometer + Aquades (W2)	gr	670
3.	Suhu Piknometer + Aquades (t)	°C	29
4.	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades (T1)	°C	0,965
5.	Harga Air Piknometer (Wt) = (W2-W1) x (T1)	gr	484,430
6.	Berat Piknometer + Abu Tempurung Kelapa (W3)	gr	640
7.	Berat Piknometer + Abu Tempurung Kelapa + Aquades (W4)	gr	930
8.	Suhu Piknometer + Aquades + Abu Tempurung Kelapa (t)	°C	30
9.	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades + Abu Tempurung Kelapa (T2)	°C	0,950
10.	Berat Jenis $G_s = \frac{W_3 - W_1}{WT - (W_4 - W_3) \times T_2}$	gr/cm ³	2,306

Berdasarkan Tabel 4.1, dapat disimpulkan bahwa hasil pengujian berat jenis abu tempurung kelapa sebesar 2,306 gr/cm³. Nilai tersebut berada dalam rentang 2,0–2,5 gr/cm³, sehingga telah memenuhi kisaran berat jenis bahan tambah mineral sesuai dengan SNI 15-2531-1991. Dengan demikian, abu tempurung kelapa yang digunakan sebagai substitusi parsial terhadap semen dalam pembuatan roster dapat dinyatakan layak digunakan karena memiliki berat jenis yang sesuai dengan standar yang berlaku.

4.1.2 Pasir

Rangkaian pengujian terhadap agregat halus atau pasir dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan serta karakteristik material sebelum dicampurkan ke dalam roster. Prosedur ini sangat penting guna memastikan bahwa pasir yang digunakan memenuhi standar kualitas beton yang ditetapkan. Parameter utama yang diidentifikasi dalam tahapan ini meliputi analisis kadar lumpur untuk menjaga ikatan antar-material, distribusi ukuran butiran melalui uji gradasi, serta penentuan berat jenis sebagai dasar perhitungan proporsi campuran yang akurat.

a. Kadar Luimpur

Pelaksanaan pengujian kadar lumpur bertujuan untuk mengidentifikasi serta membatasi persentase kandungan partikel halus atau pengotor yang terdapat dalam agregat halus. Hal ini dilakukan karena keberadaan lumpur yang berlebih dapat menurunkan daya rekat antara semen dan pasir, yang pada akhirnya berisiko menurunkan mutu dari roster tersebut. Rincian data hasil pengujian kadar lumpur telah disajikan pada Tabel 4.2

Tabel 4. 2 Pemeriksaan Kadar Lumpur Pasir

Tinggi Lumpur	Tinggi Pasir
125 ml	121 ml

Dari perolehan data pemeriksaan tersebut, selanjutnya melakukan analisis dan perhitungan sebagai berikut:

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

Keterangan:

A : Tinggi Lumpur (ml)

B : Tinggi Pasir (ml)

Perhitungan:

$$\begin{aligned}
 \text{Kadar Lumpur} &= \frac{(125-121)}{125} \times 100\% \\
 &= \frac{4}{125} \times 100\% \\
 &= 3,2 \%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai kadar lumpur pada pasir sebesar 3,2%. Nilai tersebut berada dalam batas yang diperkenankan menurut ketentuan SK-SNI-S-04-1989-F, yang mensyaratkan bahwa kandungan lumpur pada agregat halus tidak melebihi 5%. Batasan ini ditetapkan karena keberadaan lumpur dalam jumlah berlebih dapat mengganggu proses ikatan antara semen dan agregat halus, sehingga berpotensi menurunkan mutu campuran beton yang dihasilkan.

b. Gradasi Pasir

Analisis gradasi agregat halus dilakukan dengan tujuan untuk mengklasifikasikan distribusi dimensi butiran pasir melalui serangkaian ukuran ayakan yang bervariasi. Prosedur ini memetakan variasi ukuran butir yang akan mengisi rongga dalam campuran roster agar tercapai kepadatan yang maksimal. Dari pengujian ini, diperoleh data primer berupa berat material yang tertahan pada setiap saringan, yang selanjutnya diproses melalui perhitungan untuk mendapatkan nilai persentase berat tertahan kumulatif serta persentase lolos kumulatif. Hasil analisis ini kemudian digunakan sebagai instrumen untuk menentukan Modulus Kehalusan (MH) butiran pasir tersebut. Adapun hasil evaluasi terhadap gradasi butiran pasir yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Pemeriksaan Gradasi Pasir

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertinggal (gr)
9,5	0
4,75	30,5
2,36	82
1,18	168
0,6	261,8
0,3	218
0,15	152,5
Sisa	86,9
Jumlah	999,7

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

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

Perhitungan:

- Berat tertinggal (%) $= \frac{\text{Berat tertinggal}}{\text{Berat total}} \times 100\%$
 $= \frac{30,5}{999,7} \times 100\%$
 $= 3,051\%$
- Berat kumulatif(%) $= \text{Persentase berat tertinggal} + \text{persentase}$
 $\text{berat tertinggal sebelumnya}$
 $= 3,051\% + 0\%$
 $= 3,051\%$
- Lolos kumulatif (%) $= 100\% - \text{Persentase Tertinggal}$
 $= 100\% - 3,051\%$
 $= 96,949\%$
- Modulus halus butir $= \frac{\Sigma \text{Berat Tertinggalk Kumulatif}}{100}$
 $= \frac{364,006}{100} \times 100\%$
 $= 3,640\%$

Metode perhitungan yang digunakan pada setiap ukuran saringan dilakukan dengan cara yang sama. Adanya perbedaan antara berat total hasil pengujian dan berat awal disebabkan oleh kehilangan material, seperti butiran pasir yang tertinggal pada saringan ataupun tercecer saat proses pengujian. Rekapitulasi hasil perhitungan gradasi pasir secara keseluruhan pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 4 Hasil Pemeriksaan Gradasi Pasir

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertinggal (gr)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persentase Lolos Kumulatif (%)
9,5	0	0	0	100
4,75	30,5	3,050	3,050	96,950
2,36	82	8,220	11,270	88,730
1,18	168	16,800	28,070	71,930
0,6	261,8	26,183	54,253	45,747
0,3	218	21,800	76,053	23,947
0,15	152,5	15,257	91,310	8,690
Sisa	86,9	8,690	100,000	0
Jumlah	999,7	100,000	364,006	

Berdasarkan Tabel 4.4, hasil pengujian gradasi pasir menunjukkan nilai modulus butir halus sebesar 3,640%. Jika merujuk pada ketentuan SNI 03-1972-1990, rentang modulus butir halus untuk pasir berada pada 1,5% - 3,8%. Dengan demikian, nilai yang diperoleh pada pengujian ini masih berada dalam batas yang dipersyaratkan sehingga gradasi pasir dinyatakan memenuhi standar.

c. Berat Jenis Pasir

Pelaksanaan pengujian berat jenis dimaksudkan sebagai langkah dalam merumuskan rencana proporsi campuran (*mix design*) untuk pembuatan roster. Data yang diperoleh dari pengujian ini berfungsi untuk menentukan rasio perbandingan antar-material secara akurat, sehingga setiap komponen bahan substitusi maupun bahan utama dapat tercampur dengan baik. Hal ini memastikan bahwa perhitungan volume material dalam campuran benar-benar sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan. Adapun hasil pengujian berat jenis sebagai dasar perhitungan proporsi campuran disajikan dalam Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Pasir

No.	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1.	Berat Piknometer Kosong (W1)	gr	169
2.	Berat Piknometer + Aquades (W2)	gr	668
3.	Suhu Piknometer + Aquades (t)	°C	30
4.	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades (T1)	°C	0,966
5.	Harga Air Piknometer (WT) = (W2-W1) x (T1)	gr	482,034
6.	Berat Piknometer + Pasir (W3)	gr	625
7.	Berat Piknometer + Pasir + Aquades (W4)	gr	940
8.	Suhu Piknometer + Aquades + Pasir (t)	°C	31
9.	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades + Pasir (T2)	°C	0,952
10.	Berat Jenis $G_s = \frac{W3 - W1}{WT - (W4 - W3) \times T2}$	gr/cm ³	2,71

Berdasarkan Tabel 4.5, diperoleh nilai berat jenis pasir sebesar 2,71 gr/cm³.

Nilai tersebut masih berada dalam rentang yang disyaratkan oleh SNI 1970:2008, yaitu antara 1,6 gr/cm³ hingga 3,3 gr/cm³. Dengan demikian, pasir yang digunakan telah memenuhi ketentuan standar dan layak dimanfaatkan sebagai bahan campuran dalam pembuatan roster.

4.1.3 Semen

Evaluasi kualitas semen sebagai bahan pengikat utama dalam campuran roster dilakukan melalui dua tahap pengujian, yaitu pemeriksaan fisik secara visual dan pengujian berat jenis. Observasi visual bertujuan untuk memastikan bahwa semen dalam kondisi baik, tidak menggumpal, serta terbebas dari kontaminasi kelembapan udara yang dapat menurunkan efektivitas hidrasi. Sementara itu, pengujian berat jenis dilakukan untuk memperoleh data guna keperluan perhitungan proporsi volume campuran, sehingga konsistensi mutu beton roster dapat terjaga sesuai standar yang ditetapkan.

a. Pemeriksaan Visual

Prosedur evaluasi semen diawali dengan pemeriksaan secara visual terhadap kemasan dan kondisi fisik material. Pemeriksaan ini difokuskan untuk memastikan bahwa kemasan semen masih tersegel rapat dan tidak mengalami kerusakan, guna mencegah terjadinya kontak langsung dengan kelembapan udara yang dapat memicu reaksi hidrasi. Selain itu, pengamatan dilakukan terhadap tekstur butiran semen untuk menjamin bahwa material tidak mengalami penggumpalan atau pengerasan.

b. Berat Jenis

Pengujian berat jenis semen dilaksanakan dalam merumuskan perencanaan kebutuhan material secara akurat pada komposisi campuran roster. Data yang diperoleh dari pengujian ini dikonversi dari satuan berat menjadi volume, sehingga proporsi semen sebagai bahan pengikat dapat ditentukan dalam *mix design*. Ketepatan dalam menentukan nilai berat jenis membuat konsistensi campuran di setiap sampel penelitian, yang pada akhirnya berpengaruh langsung pada kepadatan struktur serta kekuatan roster yang diproduksi. Adapun perolehan data dari pengujian karakteristik berat jenis semen tersebut dipaparkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Semen

No.	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1.	Berat Piknometer Kosong (W1)	gr	171
2.	Berat Piknometer + Aquades (W2)	gr	673
3.	Suhu Piknometer + Aquades (t)	°C	24
4.	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades (T1)	°C	0,968
5.	Harga Air Piknometer (WT) = (W2-W1)*(T1)	gr	485,936
6.	Berat Piknometer + Semen (W3)	gr	418
7.	Berat Piknometer + Semen + Aquades (W4)	gr	720
8.	Suhu Piknometer + Aquades + Semen (t)	°C	27

No.	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
9.	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades + Semen (T2)	°C	0,958
10.	Berat Jenis $G_s = \frac{W_3 - W_1}{WT - (W_4 - W_3) \times T_2}$	gr/cm ³	3,09

Berdasarkan data pada Tabel 4.6, hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis semen sebesar 3,09 gr/cm³. Nilai tersebut berada dalam kisaran berat jenis semen secara standar yaitu sekitar 3,00–3,20 gr/cm³. Dengan demikian, hasil pengujian telah sesuai dengan ketentuan SK SNI 03-2834-2002, sehingga semen yang digunakan dinyatakan memenuhi persyaratan dan layak diaplikasikan sebagai bahan campuran dalam pembuatan roster.

4.2 Analisis Pengujian Kuat Tekan Enviroster

Pengujian kuat tekan dilakukan pada sampel di Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur Universitas Diponegoro, dengan mengukur kuat tekan menggunakan alat penegang terkomputerisasi (CTM).

Dalam pelaksanaannya, pengujian melibatkan tiga sampel representatif untuk setiap variasi guna memperoleh nilai kuat tekan rata-rata yang akurat dan konsisten. Output utama dari pengujian ini adalah beban maksimal yang mampu ditahan oleh material, yang kemudian dikonversi menjadi nilai kuat tekan dengan satuan Megapascal (MPa) sebagai parameter standar mutu beton. Data hasil pengujian tersebut disajikan secara sistematis pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Kuat Tekan Roster Umur 14 Hari

Material	Kode Sampel	Umur (Hari)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-Rata Kuat Tekan (Mpa)
EA0	A	14	1,95	1,87
	B		1,8	
	C		1,85	
EA2,5	A	14	1,75	1,78
	B		1,8	
	C		1,8	
EA5	A	14	1,9	1,88
	B		1,8	
	C		1,95	
EA7,5	A	14	1,9	1,9
	B		1,95	
	C		1,85	

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan pada umur 14 hari, variasi EA0 sebagai roster konvensional menunjukkan kuat tekan rata-rata sebesar 1,87 MPa. Nilai tersebut diperoleh dari tiga benda uji dengan hasil masing-masing 1,95 MPa, 1,8 MPa, dan 1,85 MPa. Sementara itu, variasi EA2,5, EA5, dan EA7,5 merupakan roster dengan penambahan abu tempurung kelapa sebagai bahan substitusi sebagian campuran. Pada variasi EA2,5 diperoleh kuat tekan rata-rata sebesar 1,78 MPa, yang berasal dari hasil pengujian masing-masing 1,75 MPa, 1,8 MPa, dan 1,8 MPa. Pada variasi EA5 terjadi peningkatan kuat tekan dengan nilai rata-rata sebesar 1,88 MPa, berdasarkan hasil 1,9 MPa, 1,8 MPa, dan 1,95 MPa. Nilai kuat tekan tertinggi dalam penelitian ini diperoleh pada variasi EA7,5 dengan rata-rata sebesar 1,90 MPa, yang dihasilkan dari tiga benda uji dengan nilai 1,9 MPa, 1,95 MPa, dan 1,85 MPa.

Nilai kuat tekan roster pada umur 28 hari dapat ditentukan melalui perhitungan berdasarkan ketentuan PBI-1971 guna memperoleh estimasi kuat tekan

maksimum. Perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan data hasil pengujian pada umur 14 hari, yang selanjutnya diolah menggunakan persamaan sebagai berikut:

Tabel 4. 8 Angka Konversi Umur Beton

Umur Beton (Hari)	Angka Konversi
3	0,40
7	0,65
14	0,88
21	0,95
28	1,00

Sumber: PBI-1971

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{\rho}{A}$$

Keterangan:

ρ : Beban tekan maksimum (Kgf atau N)

A : Luas penampang (mm²)

Variasi EA0

- EA0 (A) $= \frac{\rho}{A}$
 $= \frac{39000}{20000}$
 $= 1,95 \text{ MPa}$

- EA0 (B) $= \frac{\rho}{A}$
 $= \frac{36000}{20000}$
 $= 1,8 \text{ MPa}$

- EA0 (C) $= \frac{\rho}{A}$
 $= \frac{37000}{20000}$
 $= 1,85 \text{ MPa}$

Rata-rata kuat tekan sampel EA0 umur 14 hari

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1,95+1,8+1,85}{3} \\
 &= \frac{5,6}{3} \\
 &= 1,87 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Maka, hasil kuat tekan roster pada umur 28 hari:

$$\begin{aligned}
 \text{EA0 umur 28 hari} &= \frac{\text{Rata-rata kuat tekan umur 14 hari}}{\text{Angka konversi 14 hari}} \\
 &= \frac{1,87}{0,88} \\
 &= 2,13 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

Variasi EA2,5

- $$\begin{aligned}
 \bullet \text{ EA2,5 (A)} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{35000}{20000} \\
 &= 1,75 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned}
 \bullet \text{ EA2,5 (B)} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{36000}{20000} \\
 &= 1,8 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned}
 \bullet \text{ EA2,5 (C)} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{36000}{20000} \\
 &= 1,8 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Rata-rata kuat tekan sampel EA2,5 umur 14 hari

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1,75+1,8+1,8}{3} \\
 &= \frac{5,35}{3} \\
 &= 1,78 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Maka, hasil kuat tekan roster pada umur 28 hari:

$$\begin{aligned}
 \text{EA2,5 umur 28 hari} &= \frac{\text{Rata-rata kuat tekan umur 14 hari}}{\text{Angka konversi 14 hari}} \\
 &= \frac{1,78}{0,88} \\
 &= 2,02 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

Variasi EA5

- $$\begin{aligned}
 \bullet \text{ EA5 (A)} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{38000}{20000} \\
 &= 1,9 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned}
 \bullet \text{ EA5 (B)} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{36000}{20000} \\
 &= 1,8 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned}
 \bullet \text{ EA5 (C)} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{39000}{20000} \\
 &= 1,95 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Rata-rata kuat tekan sampel EA5 umur 14 hari

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1,9+1,8+1,95}{3} \\
 &= \frac{5,65}{3} \\
 &= 1,88 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Maka, hasil kuat tekan roster pada umur 28 hari:

$$\begin{aligned}
 \text{EA5 umur 28 hari} &= \frac{\text{Rata-rata kuat tekan umur 14 hari}}{\text{Angka konversi 14 hari}} \\
 &= \frac{1,88}{0,88} \\
 &= 2,14 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

Variasi EA7,5

- $$\begin{aligned} \bullet \text{ EA7,5 (A)} &= \frac{\rho}{A} \\ &= \frac{38000}{20000} \\ &= 1,9 \text{ MPa} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} \bullet \text{ EA7,5 (B)} &= \frac{\rho}{A} \\ &= \frac{39000}{20000} \\ &= 1,95 \text{ MPa} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} \bullet \text{ EA7,5 (C)} &= \frac{\rho}{A} \\ &= \frac{37000}{20000} \\ &= 1,85 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Rata-rata kuat tekan sampel EA7,5 umur 14 hari

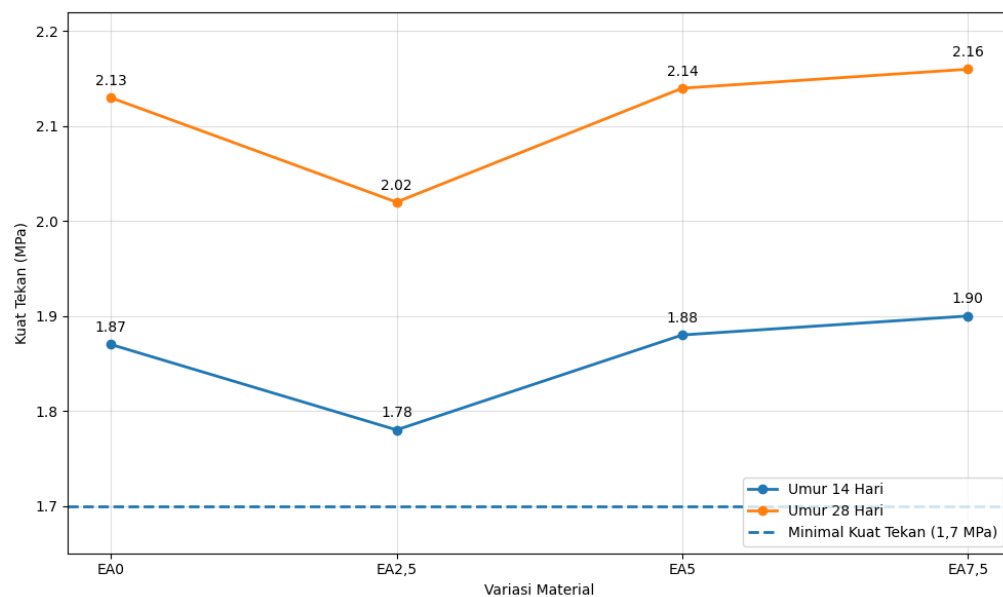
$$\begin{aligned} &= \frac{1,9+1,95+1,85}{3} \\ &= \frac{5,7}{3} \\ &= 1,9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Maka, hasil kuat tekan roster pada umur 28 hari:

$$\begin{aligned} \text{EA7,5 umur 28 hari} &= \frac{\text{Rata-rata kuat tekan umur 14 hari}}{\text{Angka konversi 14 hari}} \\ &= \frac{1,9}{0,88} \\ &= 2,16 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Tabel 4. 9 Hasil Kuat Tekan Roster Umur 28 Hari

Material	Umur (Hari)	Rata-Rata Kuat Tekan (Mpa)	SNI 03-0349-1989 (Memenuhi/Tidak Memenuhi)
EA0	28	2,13	Memenuhi
EA2,5	28	2,02	Memenuhi
EA5	28	2,14	Memenuhi
EA7,5	28	2,16	Memenuhi



Grafik 4. 1 Rata-Rata Hasil Pengujian Kuat Tekan Roster

Berdasarkan grafik perbandingan rata-rata kuat tekan roster pada umur 14 dan 28 hari, terlihat bahwa seluruh variasi mengalami peningkatan nilai kuat tekan seiring bertambahnya umur perawatan. Pada umur 14 hari, variasi EA0 sebagai roster konvensional menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 1,87 MPa.

Sementara itu, variasi dengan penambahan abu tempurung kelapa menunjukkan nilai yang cukup kompetitif, yaitu EA2,5 sebesar 1,78 MPa, EA5 sebesar 1,88 MPa, dan EA7,5 sebesar 1,90 MPa.

Setelah dikonversi ke umur 28 hari berdasarkan ketentuan PBI-1971, nilai kuat tekan meningkat menjadi 2,13 MPa untuk EA0, 2,02 MPa untuk EA2,5, 2,14 MPa untuk EA5, dan 2,16 MPa untuk EA7,5. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa variasi dengan penambahan abu tempurung kelapa sebesar 5% dan 7,5% mampu menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan roster konvensional. Variasi EA7,5 menjadi yang tertinggi dengan nilai 2,16 MPa pada umur 28 hari.

Kecenderungan peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan abu tempurung kelapa pada kadar tertentu dapat memberikan kontribusi terhadap kuat tekan roster. Hal ini sejalan dengan penelitian (Hardini dkk., 2021) yang menyatakan bahwa abu tempurung kelapa mengandung silika bersifat pozzolan. Sifat pozzolan tersebut menciptakan terjadinya reaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, sehingga membentuk senyawa tambahan yang memperpadat struktur dan meningkatkan kekuatan tekan.

Dengan demikian, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa abu tempurung kelapa bukan hanya berperan sebagai bahan substitusi, tetapi juga berpotensi meningkatkan kuat tekan roster. Namun demikian, peningkatan tersebut tetap dipengaruhi oleh proporsi campuran yang digunakan, sehingga diperlukan penentuan kadar optimum agar diperoleh hasil yang maksimal.

4.3 Analisis Pengujian Daya Serap Air Enviroster

Pengujian absorpsi atau daya serap air dilakukan untuk mengevaluasi penggunaan arang tempurung kelapa sebagai bahan substitusi parsial dalam meminimalisir porositas roster. Analisis ini bertujuan untuk mengukur sejauh mana material mampu menyerap air, yang menjadi indikator tingkat kepadatan dan keawetan benda uji.

Prosedur pengujian mencakup tiga buah sampel untuk menjaga validitas data. Pengujian dilaksanakan benda uji mencapai umur 14 hari guna mengamati perkembangan karakteristik fisik material selama proses pematangan. Analisis

lebih lanjut terhadap perolehan data pengujian daya serap air dilakukan dengan mengacu pada formulasi yang ditetapkan dalam SNI 03-0349-1989, yang rinciannya dijabarkan sebagai berikut.

$$\text{Daya Serap Air} = \frac{A-B}{B} \times 100\%$$

Keterangan:

A : Berat basah benda uji (gram)

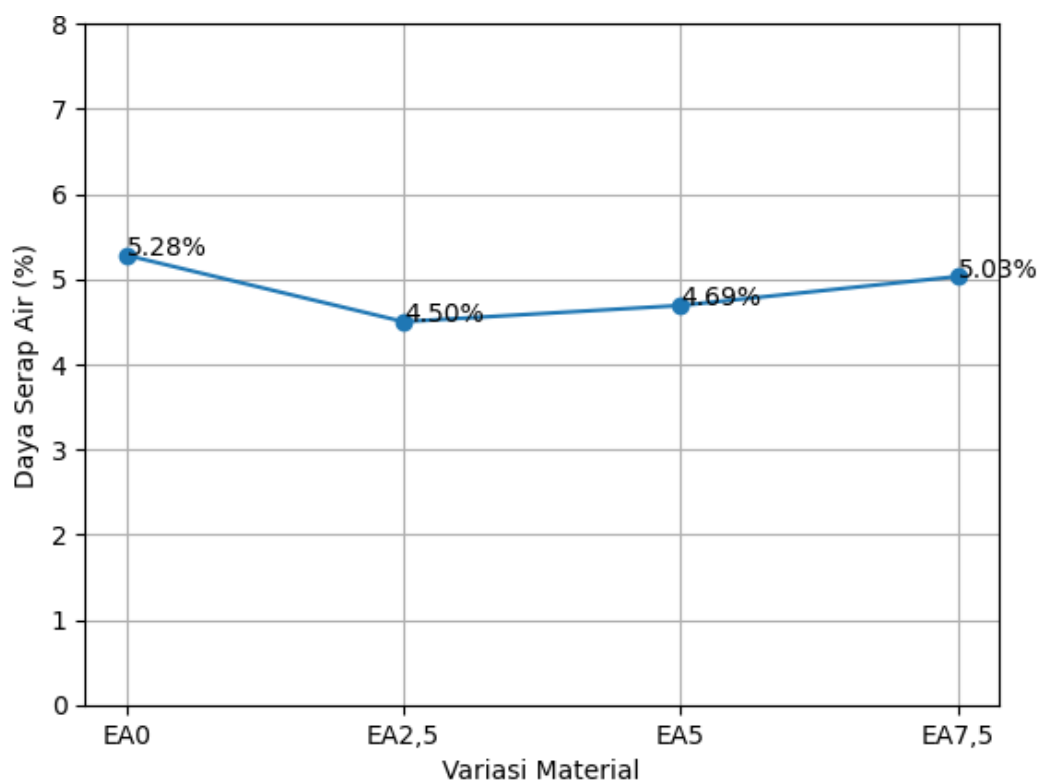
B : Berat kering benda uji (gram)

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Berat Roster pada Daya Serap Air

Material	Kode Sampel	Berat Basah (A) (gram)	Berat Kering (B) (gram)
EA0	A	3990	3790
	B	4015	3810
	C	3960	3765
EA2,5	A	3985	3815
	B	3970	3795
	C	4015	3845
EA5	A	3985	3805
	B	3955	3775
	C	4010	3835
EA7,5	A	4015	3825
	B	3975	3780
	C	4030	3840

Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Daya Serap Air Roster

Material	Kode Sampel	Berat Basah (A) (gram)	Berat Kering (B) (gram)	Hasil Penyerapan Air (%)	Rata-Rata Penyerapan Air (%)	Keterangan (Memenuhi/Tidak Memenuhi)
EA0	A	3990	3790	5,28	5,28	Memenuhi
	B	4015	3810	5,38		
	C	3960	3765	5,18		
EA2,5	A	3985	3815	4,46	4,50	Memenuhi
	B	3970	3795	4,61		
	C	4015	3845	4,42		
EA5	A	3985	3805	4,73	4,69	Memenuhi
	B	3955	3775	4,77		
	C	4010	3835	4,56		
EA7,5	A	4015	3825	4,97	5,03	Memenuhi
	B	3975	3780	5,16		
	C	4030	3840	4,95		



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

Berdasarkan grafik rata-rata daya serap air roster berukuran 20 cm x 20 cm x 10 cm, terlihat bahwa seluruh variasi menunjukkan nilai penyerapan air yang relatif rendah dan masih berada dalam batas yang dipersyaratkan. Variasi EA0 sebagai roster tanpa campuran abu tempurung kelapa memiliki nilai rata-rata daya serap sebesar 5,28%. Pada variasi dengan penambahan abu tempurung kelapa diperoleh nilai 4,50% pada EA2,5; 4,69% pada EA5; dan 5,03% pada EA7,5. Nilai terendah terdapat pada variasi EA2,5, yang menunjukkan bahwa penambahan abu tempurung kelapa dalam kadar tertentu mampu meningkatkan kepadatan struktur roster dan menurunkan tingkat porositas terbuka.

Penurunan daya serap air pada variasi EA2,5 dan EA5 diduga terjadi karena abu arang tempurung kelapa memiliki kandungan silika (SiO_2) dan oksida lainnya yang bersifat pozzolan, sehingga mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen dan membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan. Reaksi ini berkontribusi terhadap pemadatan dan pengisian rongga mikro dalam campuran. Hal ini sejalan dengan penelitian Langitan dkk. (2022) yang menyatakan bahwa substitusi abu arang tempurung kelapa dalam kadar optimum mampu

menghasilkan kuat tekan maksimum pada variasi 5%. Peningkatan kuat tekan tersebut secara tidak langsung menunjukkan terjadinya perbaikan struktur internal beton akibat berkurangnya pori-pori yang tidak terisi.

Selain itu, berdasarkan penelitian Verlina (2014), arang aktif tempurung kelapa memiliki struktur pori yang berkembang dan luas permukaan yang tinggi. Dalam konteks material berbasis semen, partikel halus abu tempurung kelapa yang terdistribusi merata dapat berfungsi sebagai filler yang membantu memperkecil rongga antar partikel. Namun, apabila jumlah substitusi terlalu tinggi, seperti pada variasi EA7,5, peningkatan kandungan partikel karbon yang tidak seluruhnya bereaksi dapat menyebabkan terbentuknya pori tambahan sehingga nilai daya serap kembali meningkat meskipun masih dalam batas standar.

Secara keseluruhan, seluruh variasi roster campuran abu tempurung kelapa memenuhi persyaratan SNI 03-0349-1989 karena nilai rata-rata daya serap air berada di bawah 6%. Variasi EA2,5 dapat dikategorikan sebagai komposisi paling optimal dalam penelitian ini karena menghasilkan nilai daya serap terendah sekaligus menunjukkan kecenderungan struktur yang lebih padat dibandingkan variasi lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan limbah abu tempurung kelapa tidak hanya berkontribusi terhadap aspek keberlanjutan lingkungan, tetapi juga mampu meningkatkan kualitas fisik roster apabila digunakan pada kadar yang tepat.

4.4 Analisis Pengujian Sifat Fisik Envyroster

Berdasarkan pengujian yang dilakukan sesuai dengan spesifikasi SK SNI S-04-1989-F untuk klasifikasi bata beton berongga, produk Envyroster yang telah ditingkatkan ini diklasifikasikan dalam kategori 4, yang berarti bahwa produk ini dirancang khusus untuk elemen atau komponen struktural yang tidak menopang beban utama.



Gambar 4. 1 Envyroster

Secara fungsional, roster berbahan campuran abu tempurung kelapa ini direkomendasikan sebagai elemen penyekat ruangan maupun unsur dekoratif pada area interior yang terlindung dari paparan air hujan dan radiasi sinar matahari secara langsung, sehingga ketahanan dan integritas materialnya tetap terjaga dalam jangka waktu yang lebih lama. Selain memenuhi aspek fungsi tersebut, produk juga harus memenuhi standar mutu cetak. Secara visual, seluruh benda uji menunjukkan kondisi fisik yang baik, tidak terdapat retakan, tidak mengalami cacat pada bagian sudut, serta memiliki presisi bentuk dan konsistensi dimensi yang sesuai dengan rancangan cetakan awal.



Gambar 4. 2 Pengukuran Fisik Roster

Pengukuran dimensi dilakukan pada seluruh sisi roster guna memastikan tingkat keseragaman ukuran antar benda uji. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa dimensi yang diperoleh telah sesuai dengan spesifikasi perencanaan awal. Temuan ini mengindikasikan bahwa roster dengan substitusi abu tempurung kelapa tidak hanya memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga memiliki mutu fisik yang baik dan setara dengan roster konvensional pada umumnya, ditinjau dari ketepatan bentuk, kerapian hasil cetakan, serta tidak ditemukannya keretakan pada permukaan material.

4.5 Analisis Daya Serap CO₂ Enviroster

Prosedur pengujian penyerapan gas CO₂ pada sampel beton dilaksanakan dengan merujuk pada standar ASTM C 642-90, yang didasarkan pada prinsip perbandingan massa jenis material. Tahap awal pengujian dimulai dengan proses dehidrasi sampel di dalam oven pada suhu konstan 100°C selama 24 jam untuk memperoleh kondisi kering oven yang stabil. Setelah mencapai titik tersebut, spesimen kemudian dicampur dengan larutan karbonat berkonsentrasi 4% melalui metode perendaman dengan durasi terkontrol hingga 24 jam guna mencapai kondisi *Saturated Surface Dry* (SSD) atau kering permukaan. Kondisi SSD ini dipastikan dengan membersihkan sisa kelembapan pada permukaan luar beton secara teliti.

Selanjutnya, efisiensi serapan CO₂ dihitung berdasarkan selisih antara berat sampel dalam kondisi kering permukaan (SSD) terhadap berat kering oven, yang kemudian dipresentasikan dalam satuan persentase untuk menentukan kemampuan absorpsi material. Besarnya kapasitas penyerapan karbon dioksida pada material dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Serapan CO}_2 = \frac{W - W_k}{W_k} \times 100\%$$

Keterangan:

W : Berat roster pada kondisi kering permukaan (kondisi SSD) (gram)

W_k : Berat roster pada kondisi kering oven (gram)

Tabel 4. 12 Hasil Pengujian Berat Roster pada Daya Serap CO₂

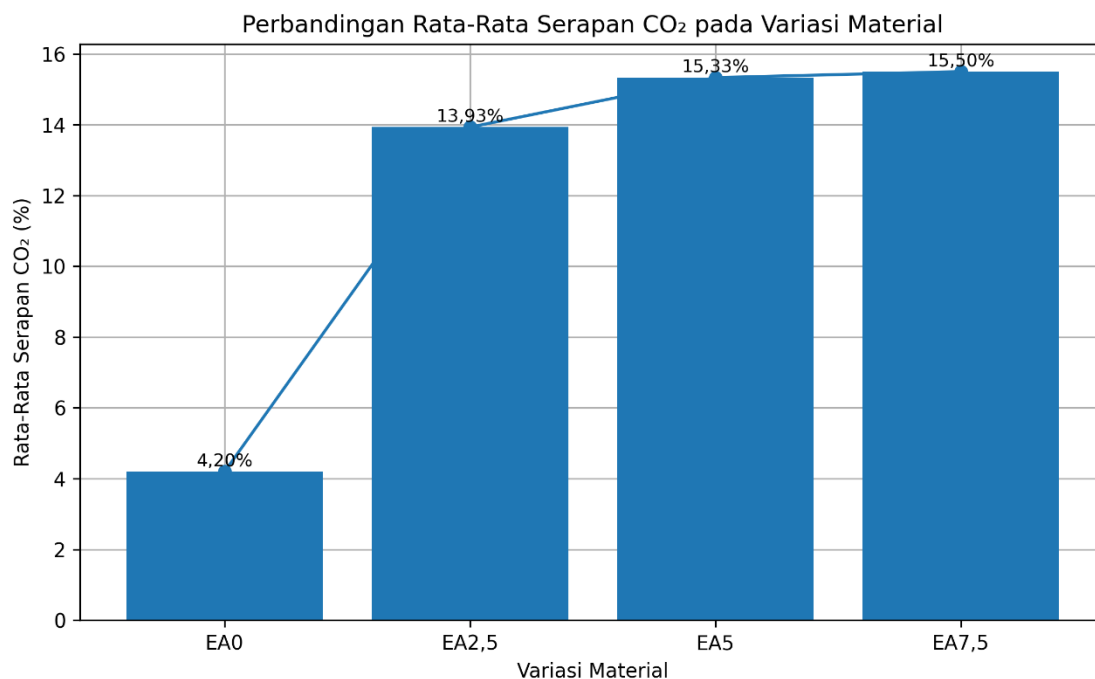
Material	Kode Sampel	Berat Kering SSD (W) (gram)	Berat Kering Oven (Wk) (gram)
EA0	A	3855	3700
	B	3958	3820
	C	3946	3765
EA2,5	A	4175	3685
	B	4290	3775
	C	4356	3790
EA5	A	4195	3680
	B	4354	3770
	C	4351	3735
EA7,5	A	4259	3720
	B	4360	3785
	C	4316	3695

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Daya Serap CO₂ Roster

Material	Kode Sampel	Berat Kering SSD (W) (gram)	Berat Kering Oven (Wk) (gram)	Serapan CO₂ (%)	Rata-Rata Serapan CO₂ (%)
EA0	A	3855	3700	4,19	4,20
	B	3958	3820	3,61	
	C	3946	3765	4,80	
EA2,5	A	4175	3685	13,3	13,93
	B	4290	3775	13,6	
	C	4356	3790	14,9	
EA5	A	4195	3680	14	15,33
	B	4354	3770	15,5	
	C	4351	3735	16,5	
EA7,5	A	4259	3720	14,5	15,50
	B	4360	3785	15,2	
	C	4316	3695	16,8	

Tabel 4. 14 Hasil Daya Serap CO₂ pada Enviroster

Material	Rata-Rata Serapan CO₂ (%)
EA0	4,20
EA2,5	13,93
EA5	15,33
EA7,5	15,50



Grafik 4. 3 Rata-Rata Hasil Pengujian Daya Serap CO₂

Berdasarkan grafik rata-rata penyerapan CO₂, terlihat bahwa variasi tanpa penambahan abu tempurung kelapa (EA0) memiliki nilai serapan paling rendah sebesar 4,20%. Setelah dilakukan penambahan abu tempurung kelapa sebesar 2,5%, nilai serapan meningkat signifikan menjadi 13,93%, naik menjadi 15,33% pada substitusi abu tempurung kelapa sebesar 5%, kemudian mencapai nilai tertinggi pada variasi 7,5% sebesar 15,50%. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan abu tempurung kelapa memberikan pengaruh terhadap peningkatan kemampuan material dalam menyerap karbon dioksida.

Proses penyerapan CO₂ pada material berbasis semen terjadi melalui mekanisme penetrasi gas ke dalam pori-pori material dan dihitung berdasarkan perbandingan berat kering oven dengan berat kondisi jenuh kering permukaan (SSD). Wibowo dkk. (2022) dalam penelitian tentang kajian serapan CO₂ pada beton bubuk reaktif menjelaskan bahwa nilai serapan merupakan indikator kemampuan material dalam menerima penetrasi gas atau cairan melalui sistem porinya. Semakin efektif distribusi dan ukuran pori dalam suatu material, maka semakin besar pula potensi penyerapan CO₂.

Abu tempurung kelapa memiliki kandungan karbon dan silika yang berpotensi membentuk struktur mikro yang lebih reaktif dan berpori. Penelitian yang dilakukan oleh Bajo dan Samosir (2019) menunjukkan bahwa karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki kemampuan adsorpsi CO₂ yang signifikan setelah melalui proses aktivasi, di mana kapasitas adsorpsi meningkat hingga 2,5 kali dibandingkan karbon tanpa aktivasi. Hal ini terjadi karena proses aktivasi mampu meningkatkan luas permukaan spesifik dan jumlah pori aktif yang berperan dalam mekanisme adsorpsi gas.

Penelitian serupa oleh Verlina (2014) yang menyatakan bahwa arang aktif tempurung kelapa memiliki struktur pori yang lebih terbuka dan luas permukaan yang lebih besar setelah proses aktivasi, sehingga efektif dalam menyerap gas. Dengan mengacu pada hasil penelitian terdahulu tersebut, peningkatan nilai serapan CO₂ pada variasi EA2,5, EA5, hingga EA7,5 dalam penelitian ini dapat dijelaskan sebagai akibat dari kontribusi sifat berpori dan kandungan karbon pada abu tempurung kelapa yang meningkatkan kemampuan adsorptif material.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa abu tempurung kelapa terbukti mampu meningkatkan kemampuan penyerapan CO₂ dibandingkan roster konvensional, dengan komposisi optimum pada variasi tertinggi yaitu 7,5%. Temuan ini relevan dengan kondisi kualitas udara perkotaan di Indonesia, khususnya Jakarta, yang menunjukkan tren paparan polutan halus PM_{2.5} meningkat dari rata-rata tahunan 36 ug/m³ pada tahun 2022 menjadi 38 ug/m³ pada tahun 2023 (FKM UI, 2023), serta pada tahun 2024 Jakarta juga dilaporkan memiliki rata-rata tahunan PM_{2.5} yang tetap tinggi yaitu 41,7 ug/m³ (CREA, 2025), sementara pedoman *World Health Organization* merekomendasikan rata-rata tahunan PM_{2.5} sebesar 5 ug/m³ (WHO, 2021). Dalam konteks tersebut, envyroster dapat diposisikan sebagai salah satu sarana yang aplikatif di rumah, karena berdasarkan hasil penelitian ini, material roster dengan abu tempurung kelapa memiliki kemampuan adsorpsi CO₂ yang lebih baik sehingga berpotensi membantu menurunkan CO₂ di dalam ruang dan mendukung kondisi udara rumah yang lebih bersih dan sehat, tentunya harus tetap disertai ventilasi yang memadai.

4.6 Analisis Biaya

Analisis biaya dilakukan untuk mengetahui serta membandingkan nilai ekonomis antara produksi roster konvensional dengan roster inovasi yang menggunakan substitusi parsial abu tempurung kelapa. Analisis biaya ini hanya mencakup komponen biaya material saja, dan belum termasuk biaya upah tenaga kerja, biaya operasional, serta biaya lain seperti transportasi atau peralatan produksi. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi biaya produksi dari setiap variasi campuran, yang rincian kebutuhannya dipaparkan pada bagian berikut.

a. Enviroster EA0

Enviroster EA0 dikategorikan sebagai roster konvensional dengan penggunaan proporsi material semen sebesar 1%, pasir 4%, dan air 0,28. Analisa biaya yang untuk pembuatan Enviroster EA0 adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 15 Total Biaya Enviroster EA0

Enviroster EA0					
No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir	2.955,226	gram	Rp600	Rp1.774
2.	Semen	738,806	gram	Rp1.325	Rp979
Total Biaya / Roster					Rp2.753
Total Biaya / 1 m²					Rp68.825

Analisa biaya produksi untuk Enviroster EA0 adalah sebesar Rp2.753 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel. Untuk aplikasi dalam skala luas, biaya pembuatan Enviroster EA0 per 1 m² adalah sebesar Rp68.825.

b. Enviroster EA2,5

Enviroster EA2,5 dikategorikan sebagai roster non-konvensional yang menggunakan komposisi substitusi parsial semen berupa 2,5% abu tempurung kelapa, dengan proporsi material 4% pasir dan air sebesar 0,28. Estimasi biaya yang dikeluarkan untuk pembuatan Enviroster EA2,5 dirinci sebagai berikut.

Tabel 4. 16 Total Biaya Enviroster EA2,5

Enviroster EA2,5					
No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Arang Tempurung Kelapa	30,784	gram	Rp9.000	Rp278
2.	Pasir	2.955,226	gram	Rp600	Rp1.774
3.	Semen	708,023	gram	Rp1.325	Rp938
Total Biaya / Enviroster					Rp2.990
Total Biaya / 1 m²					Rp74.750

Analisa biaya produksi untuk Enviroster EA2,5 adalah sebesar Rp2.990 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.16. Untuk aplikasi dalam skala luas, biaya pembuatan Enviroster EA2,5 per 1 m² adalah sebesar Rp74.750.

c. Enviroster EA5

Enviroster EA5 dikategorikan sebagai roster non-konvensional yang menggunakan komposisi substitusi parsial semen berupa 5% abu tempurung kelapa, dengan proporsi material 4% pasir dan air sebesar 0,28. Estimasi biaya yang dikeluarkan untuk pembuatan Enviroster EA5 dirinci sebagai berikut.

Tabel 4. 17 Total Biaya Enviroster EA5

Enviroster EA5					
No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Arang Tempurung Kelapa	61,567	gram	Rp9.000	Rp555
2.	Pasir	2.955,226	gram	Rp600	Rp1.774
3.	Semen	677,239	gram	Rp1.325	Rp898
Total Biaya / Enviroster					Rp3.277
Total Biaya / 1 m²					Rp81.925

Analisa biaya produksi untuk Enviroster EA5 adalah sebesar Rp3.277 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.17. Untuk aplikasi dalam skala luas, biaya pembuatan Enviroster EA5 per 1 m² adalah sebesar Rp81.925.

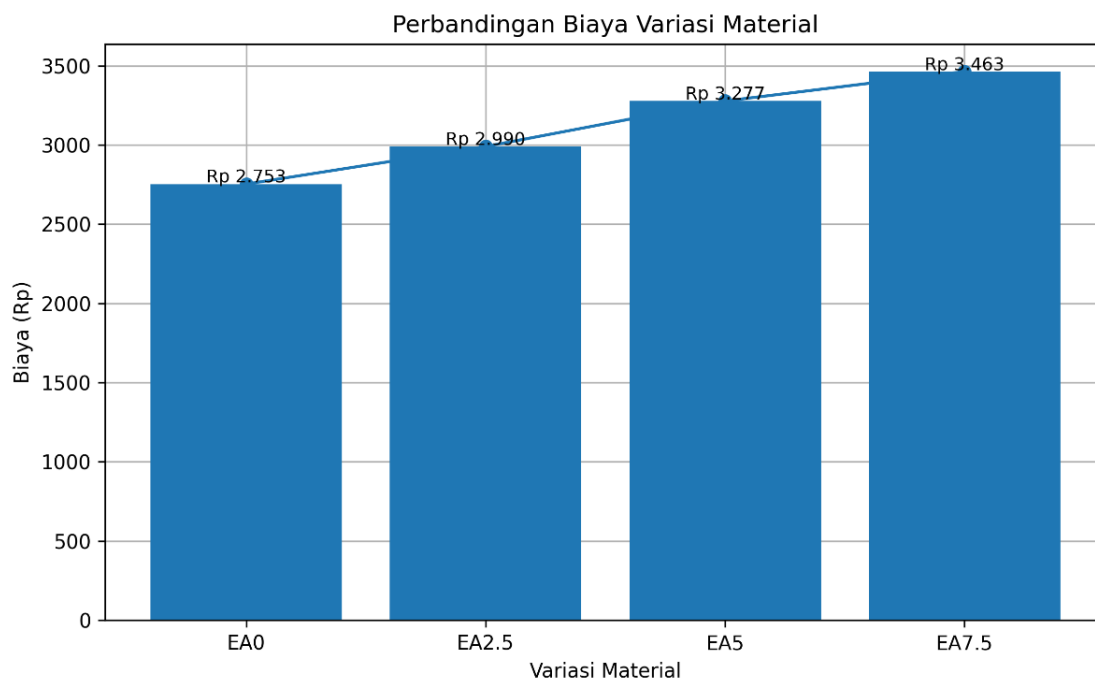
d. Envyroster EA7,5

Envyroster EA7,5 dikategorikan sebagai roster non-konvensional yang menggunakan komposisi substitusi parsial semen berupa 7,5% abu tempurung kelapa, dengan proporsi material 4% pasir dan air sebesar 0,28. Estimasi biaya yang dikeluarkan untuk pembuatan Envyroster EA7,5 dirinci sebagai berikut.

Tabel 4. 18 Total Biaya Envyroster EA7,5

Envyroster EA7,5					
No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Arang Tempurung Kelapa	92,351	gram	Rp9.000	Rp832
2.	Pasir	2.955,226	gram	Rp600	Rp1.774
3.	Semen	646,456	gram	Rp1.325	Rp857
Total Biaya / Envyroster					Rp3.463
Total Biaya / 1 m2					Rp86.575

Analisa biaya produksi untuk Envyroster EA7,5 adalah sebesar Rp3.463 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.18. Untuk aplikasi dalam skala luas, biaya pembuatan Envyroster EA7,5 per 1 m2 adalah sebesar Rp86.575.



Grafik 4. 4 Perbandingan Harga Enviroster

Berdasarkan grafik perbandingan harga roster, terlihat adanya kecenderungan peningkatan biaya produksi seiring dengan bertambahnya variasi campuran abu tempurung kelapa. Variasi EA0 memiliki harga paling rendah sebesar Rp 2.753, kemudian meningkat pada EA2,5 menjadi Rp 2.990. Kenaikan yang lebih signifikan terjadi pada EA5 dengan harga Rp 3.277, dan nilai tertinggi terdapat pada EA7,5 sebesar Rp 3.463. Pola ini menunjukkan bahwa semakin besar persentase penambahan abu tempurung kelapa dalam campuran, maka biaya produksi roster cenderung meningkat. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh tambahan proses pengolahan, kebutuhan material, maupun perlakuan khusus pada campuran. Meskipun terjadi peningkatan harga, selisih biaya antar variasi masih berada dalam rentang yang relatif terkendali, sehingga secara ekonomi variasi campuran dengan abu tempurung kelapa tetap berpotensi untuk diaplikasikan dalam produksi roster.

4.7 Hasil Penelitian

Hasil penelitian yang diperoleh disajikan dalam rekapitulasi untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini. Rekapitulasi hasil pengujian adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 19 Rekapitulasi Hasil Penelitian

Jumlah Pengujian	Sampel			
	EA0	EA2,5	EA5	EA7,5
Kuat Tekan (Mpa)	2,13	2,02	2,14	2,16
Daya Serap Air (%)	5,28	4,50	4,69	5,03
Sifat Fisik	Sesuai	Sesuai	Sesuai	Sesuai
Daya Serap CO₂ (%)	4,20	13,93	15,33	15,50
Biaya (Rp)	Rp2.753	Rp2.990	Rp3.277	Rp3.463

Berdasarkan tabel rekapitulasi hasil pengujian, dapat dilihat bahwa penambahan abu tempurung kelapa memberikan pengaruh terhadap karakteristik mekanis, fisik, kemampuan serap CO₂, serta biaya produksi roster. Nilai kuat tekan berada pada kisaran 2,02–2,16 MPa, dengan nilai tertinggi pada variasi EA7,5 sebesar 2,16 MPa dan terendah pada EA2,5 sebesar 2,02 MPa. Meskipun terjadi variasi nilai, secara umum penambahan abu tempurung kelapa tidak menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan. Hasil ini sama seperti penelitian Hardini dkk. (2021) yang meneliti penambahan abu tempurung kelapa pada paving block, diperoleh bahwa variasi optimum terjadi pada kadar 2,5% dengan kuat tekan 10,5 Mpa. Perbedaan nilai kuat tekan tersebut dipengaruhi oleh jenis produk, komposisi campuran, serta standar mutu yang digunakan. Kedua penelitian menunjukkan bahwa abu tempurung kelapa masih dapat digunakan sebagai bahan tambah tanpa menghilangkan kemampuan kuat tekannya.

Dari sisi daya serap air, variasi EA2,5 menunjukkan nilai paling rendah sebesar 4,50%, yang menandakan porositas yang relatif lebih terkendali. Sementara itu, peningkatan paling signifikan terlihat pada daya serap CO₂, di mana campuran dengan abu tempurung kelapa menunjukkan nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan variasi tanpa campuran (EA0). Nilai serapan CO₂ tertinggi terdapat pada EA7,5 sebesar 15,50%, sedangkan EA0 (roster konvensional) hanya sebesar 4,20%. Hal ini menunjukkan bahwa substitusi abu tempurung kelapa berperan dalam meningkatkan kemampuan material dalam menyerap karbon dioksida.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Wibowo dkk. (2022) yang menjelaskan bahwa serapan CO₂ dipengaruhi oleh struktur pori dan partikel halus dalam campuran beton. Selain itu, penelitian Patrisius dan Samosir (2019) menunjukkan bahwa karbon aktif dari tempurung kelapa memiliki kapasitas adsorpsi CO₂ yang lebih tinggi setelah proses aktivasi. Verlina (2014) juga menyatakan bahwa arang aktif tempurung kelapa memiliki potensi adsorpsi gas yang baik akibat peningkatan jumlah dan luas pori permukaan. Meskipun penelitian-penelitian tersebut lebih banyak dilakukan pada beton, hasilnya mendukung bahwa tempurung kelapa memiliki kandungan karbon yang berpotensi meningkatkan kemampuan serap gas.

Dari aspek biaya, terlihat bahwa semakin besar persentase abu tempurung kelapa, biaya produksi roster juga meningkat, dengan harga tertinggi pada EA7,5 sebesar Rp3.463. Namun peningkatan biaya tersebut masih berada dalam rentang yang relatif ekonomis dibandingkan manfaat peningkatan daya serap CO₂ yang diperoleh.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menjelaskan bahwa penggunaan abu tempurung kelapa sebagai substitusi parsial dalam pembuatan roster mampu mempertahankan sifat fisik dan material serta secara signifikan meningkatkan kemampuan penyerapan CO₂. Dengan demikian, penelitian ini memperkuat temuan terdahulu sekaligus memberikan hal baru pada pengembangan material roster yang lebih ramah lingkungan dan berpotensi mendukung upaya pengurangan emisi karbon melalui inovasi material konstruksi.