

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini akan menguraikan hasil dari rangkaian pengujian laboratorium yang telah dilakukan untuk mengevaluasi pemanfaatan limbah abu tempurung kelapa sebagai substitusi semen dan serbuk sabut kelapa sebagai substitusi pasir pada pembuatan *paving porous*. Pembahasan mencakup analisis terhadap sifat mekanis dan fungsional beton, yang meliputi kuat tekan, porositas, permeabilitas dan daya serap. Data yang disajikan merupakan hasil pengujian benda uji pada umur 14 hari yang dikonversi 28 hari, guna mengetahui sejauh mana pengaruh variasi limbah terhadap performa *paving*. Hasil penelitian ini kemudian dibandingkan dengan standar mutu *paving* blok konvensional maupun spesifikasi khusus beton berpori sesuai dengan acuan ACI 522R-10.

#### **4.1. Analisis Pengujian Material**

Penelitian ini dimulai dengan pengujian material dasar sebelum masuk ke proses pembuatan benda uji beton berpori. Langkah ini bertujuan untuk mengenali sifat fisik dan kimia dari setiap bahan penyusun, terutama limbah abu tempurung dan serbuk sabut kelapa yang digunakan. Dengan memahami karakteristik tiap material, formulasi campuran dapat dipastikan memenuhi standar mutu sehingga mampu menghasilkan beton berpori dengan kualitas yang sesuai rencana.

#### **4.2. Abu Tempurung Kelapa**

Material substitusi yang digunakan dalam penelitian ini salah satunya adalah arang tempurung kelapa yang dihasilkan melalui proses karbonisasi. Tahap preparasi awal dilakukan dengan membersihkan material dari residu kotoran guna menjamin kemurnian bahan sebelum diintegrasikan ke dalam campuran.

Pengujian berat jenis terhadap arang tempurung kelapa dilakukan sebagai parameter dasar dalam perancangan proporsi kebutuhan material pada campuran beton berpori. Data berat jenis ini bersifat krusial untuk menentukan akurasi volume bahan tambah, sehingga dapat dicapai tingkat homogenitas campuran yang optimal.

Melalui data tersebut, komposisi material dapat dikontrol secara akurat untuk mendukung pembentukan struktur beton yang stabil. Hasil pengujian berat jenis arang tempurung kelapa tersebut disajikan secara terperinci pada Tabel 4.1.

**Tabel 4. 1** Tabel Berat Jenis Abu Tempurung Kelapa

No	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1.	Berat Piknometer Kosong (W1)	gr	176
2.	Berat Piknometer + Aquades (W2)	gr	704,6
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	510,1
6.	Berat Piknometer + Abu Tempurung Kelapa (W3)	gr	374
7.	Berat Piknometer + Abu Tempurung Kelapa + Aquades (W4)	gr	820,56
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 $G_s = \frac{W3 - W1}{WT - (W4 - W3) \times T2}$	gr/cm <sup>3</sup>	2,306

#### 4.2.1. Serbuk Sabut Kelapa

Pengujian berat jenis pada serbuk sabut kelapa dilakukan sebagai langkah awal untuk mengevaluasi karakteristik material ini sebelum diaplikasikan sebagai substitusi sebagian pasir (agregat halus). Karena serbuk sabut kelapa memiliki densitas yang jauh lebih rendah dibandingkan pasir konvensional, penentuan nilai berat jenisnya sangat krusial dalam proses perancangan campuran (*mix design*). Data ini digunakan sebagai basis perhitungan untuk mengonversi takaran berat menjadi volume, sehingga perbandingan komposisi material dalam campuran beton berpori tetap presisi dan akurat. Melalui pengujian ini, dapat diukur sejauh mana penggunaan limbah sabut kelapa memengaruhi berat isi beton secara keseluruhan. Rincian data hasil pengujian berat jenis serbuk sabut kelapa tersebut disajikan secara mendetail pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 2** Tabel Berat Jenis Serbuk Sabut Kelapa

No	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1.	Berat Piknometer Kosong (W1)	gr	205,5
2.	Berat Piknometer + Aquades (W2)	gr	702,3
3.	Suhu Piknometer + Aquades (t)	°c	25
4.	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades (T1)	°c	0,97
5.	Harga Air Piknometer (Wt) = (W2-W1) x (T1)	gr	481,896
6.	Berat Piknometer + Serbuk sabut kelapa (W3)	gr	259,8
7.	Berat Piknometer + Serbuk sabut Kelapa + Aquades (W4)	gr	702,5
8.	Suhu Piknometer + Aquades + Serbuk Sabut Kelapa (t)	°c	30
9.	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades + Serbuk Sabut Kelapa (T2)	°c	0,960
10.	Berat Jenis $G_s = \frac{W3 - W1}{WT - (W4 - W3) \times T2}$	gr/cm <sup>3</sup>	0,954

#### 4.2.2. Pasir

Pengujian agregat halus atau pengujian pre-produksi dilakukan untuk memastikan bahwa material tersebut memenuhi spesifikasi sebagai bahan ikat yang stabil dan tidak mengganggu proses hidrasi semen.

Berdasarkan standar SNI 03-1750-1990 atau ASTM C33, berikut adalah rangkaian pengujian yang harus dilakukan.

##### a. Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur dilakukan untuk mengidentifikasi serta membatasi persentase partikel halus atau polutan yang terkandung dalam agregat halus. Pengendalian ini bersifat krusial karena akumulasi lumpur yang melampaui batas toleransi dapat menghambat ikatan interfacial antara pasta semen dan butiran pasir. Kegagalan adhesi tersebut berisiko mereduksi integritas struktural serta mutu mekanis dari beton berpori yang dihasilkan. Data komprehensif mengenai hasil pengujian kadar lumpur tersebut disajikan pada Tabel 4.3.

**Tabel 4. 3** Pemeriksaan Kadar Lumpur Pasir

Tinggi Lumpur	Tinggi Pasir
160	155

Dari perolehan data tersebut, selanjutnya dilakukan perhitungan sebagai berikut:

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

Keterangan:

A : Tinggi Lumpur (ml)

B : Tinggi Pasir (ml)

Perhitungan:

$$\begin{aligned} Kadar Lumpur &= \frac{(160-155)}{160} \times 100\% \\ &= \frac{(5)}{160} \times 100\% \\ &= 3,125 \% \end{aligned}$$

b. Gradasi Pasir

Analisis gradasi agregat halus dilakukan untuk mengklasifikasikan distribusi dimensi butiran pasir melalui serangkaian ukuran ayakan standar. Prosedur ini bertujuan untuk memetakan variasi ukuran butir yang berperan dalam mengisi rongga antar-agregat guna mencapai kepadatan pasta pengikat yang optimal pada beton berpori. Data primer yang diperoleh dari pengujian ini berupa berat material tertahan pada setiap saringan, yang kemudian dikonversi menjadi nilai persentase berat tertahan kumulatif dan persentase lolos kumulatif. Hasil analisis tersebut digunakan sebagai instrumen untuk menentukan nilai Modulus Kehalusan (MH) agregat. Adapun evaluasi terhadap distribusi gradasi butiran pasir yang digunakan dalam penelitian ini disajikan secara mendetail pada Tabel 4.4.

**Tabel 4. 4** Pemeriksaan Gradasi Pasir

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertinggal (gr)
4,75	0

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertinggal (gr)
2,36	147,84
1,18	65,47
0,6	268,86
0,3	110,81
0,15	204,99
0,075	100,85
PAN	96,35
Jumlah	994,99

Berdasarkan hasil pengujian gradasi, diperoleh data dengan persamaan sebagai

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

Perhitungan:

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Berat Tertinggal (\%)} &= \frac{\text{Berat tertinggal}}{\text{Berat total}} \times 100\% \\
 &= \frac{147,84}{994,99} \times 100\% \\
 &= 14,858 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2. \text{ Berat Kumulatif (\%)} &= \text{Persentase berat tertinggal} + \text{persentase berat} \\
 &\text{ tertinggal saringan sebelumnya} \\
 &= 14,858\% + 0\% \\
 &= 14,858\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3. \text{ Lolos Kumulatif (\%)} &= 100\% - \text{Persentase Tertinggal} \\
 &= 100\% - 14,858\% \\
 &= 85,142\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 4. \text{ Modulus halus butir} &= \frac{\Sigma \text{Berat Tertinggal Kumulatif}}{100} \\
 &= \frac{414,869}{100} \times 100\% \\
 &= 4,148 \%
 \end{aligned}$$

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. Berikut

merupakan rekapitulasi hasil perhitungan gradasi pasir keseluruhan terdapat pada Tabel 4.5 berikut.

**Tabel 4. 5** Hasil Pemeriksaan Gradasi Pasir

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertinggal (gr)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persentase Lolos Kumulatif (%)
4,75	0	0	0	100
2,36	47,84	4,81	4,81	95,19
1,18	65,47	6,58	11,39	88,61
0,6	268,86	27,02	38,41	61,59
0,3	210,81	21,18	59,59	40,41
0,15	204,99	20,60	80,19	19,81
0,075	100,85	10,13	90,32	9,68
PAN	96,35	9,68	100,00	0
Jumlah	994,99	100,00	384,71	

c. Berat Jenis Pasir

Pengujian berat jenis dilakukan sebagai parameter fundamental dalam perancangan proporsi campuran (*mix design*) beton berpori. Data fisis yang diperoleh dari pengujian ini berfungsi untuk menentukan rasio perbandingan antar-material secara presisi, guna menjamin distribusi yang merata antara bahan substitusi dan material utama dalam campuran. Akurasi nilai berat jenis sangat krusial dalam memastikan volume material penyusun telah sesuai dengan spesifikasi teknis yang direncanakan. Hasil pengujian berat jenis yang menjadi basis perhitungan proporsi campuran tersebut disajikan pada Tabel 4.6.

**Tabel 4. 6** Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Pasir

No	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1.	Berat Piknometer Kosong (W1)	gr	205,79
2.	Berat Piknometer + Aquades (W2)	gr	704,6
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	481,45
6.	Berat Piknometer + Pasir (W3)	gr	407,2
7.	Berat Piknometer + Pasir + Aquades (W4)	gr	830,8
8.	Suhu Piknometer + Aquades + Pasir (t)	°c	29

No	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
9.	Koreksi Suhu Piknometer + Aquades + Pasir (T2)	°c	0,952
10.	Berat Jenis $G_s = \frac{W_3 - W_1}{WT - (W_4 - W_3) \times T_2}$	gr/cm <sup>3</sup>	2,563

Berdasarkan Tabel 4.6, diperoleh nilai berat jenis pasir sebesar 2,563 gr/cm<sup>3</sup>. Nilai tersebut masih berada dalam rentang yang disyaratkan oleh SNI 1970:2008, yaitu antara 1,6 gr/cm<sup>3</sup> hingga 3,3 gr/cm<sup>3</sup>. Dengan demikian, pasir yang digunakan telah memenuhi ketentuan standar dan layak dimanfaatkan sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton berpori.

#### 4.2.3. Uji Ikat Awal Semen

Pada pengujian ikat semen ini didasarkan pada (SNI 2049-2015,2015), ASTM C 191-01°, ASTM C 266-00 dimaksudkan untuk mengukur durasi yang diperlukan semen hingga kondisi mengeras. Pengujian dilakukan pada 2 variasi yaitu variasi ATK0-CPT0 semen tanpa campuran dan variasi ATK2,5-CPT0 dengan substitusi abu tempurung kelapa terlihat pada Tabel 4.7.

**Tabel 4. 7** Hasil Pengujian Waktu Ikat Semen

Variasi	Penurunan ke-10 menit (mm)	Penurunan ke-2 15 menit (mm)	Penurunan ke-3 30 menit (mm)	Penurunan ke-4 45 menit (mm)	Penurunan ke-5 60 menit (mm)
A	50	38	34	27	25
B	45	34	30	25	23

Sumber : Dokumen Pribadi

Keterangan:

Penurunan ke-1 terjadi pada menit pertama.

Penurunan ke-2 hingga ke-5 terjadi pada kelipatan 15 menit setelahnya.

Hasil pengujian waktu ikat menunjukkan bahwa variasi ATK2,5-CPT0 yaitu substitusi abu tempurung kelapa memiliki Perhitungan waktu pengikatan awal semen dilakukan setelah jarum vicat menembus hingga 25 mm, dengan menggunakan rumus berikut:

$$\text{Pengikatan awal (menit)} = a + \frac{x-25}{x-y} x(b - a)$$

Keterangan:

a = Waktu sebelum penetrasi terakhir (menit)

b = Waktu penetrasi terakhir (menit)

x = Penurunan jarum sebelum penetrasi terakhir (mm)

y = Penurunan jarum jam terakhir (mm)

Perhitungan nilai pengikat awal semen tiap variasi didapatkan sebagai berikut:

a. Pengujian awal variasi ATK0-CPT0

$$\begin{aligned} \text{Pengikatan awal (menit)} &= a + \frac{x-25}{x-y} x(b - a) \\ &= 45 + \frac{27-25}{27-25} x(60 - 45) \\ &= 60 \text{ Menit} \geq 45 \text{ Menit (Memenuhi)} \end{aligned}$$

b. Pengujian awal variasi ATK2,5-CPT0

$$\begin{aligned} \text{Pengikatan awal (menit)} &= a + \frac{x-25}{x-y} x(b - a) \\ &= 45 + \frac{25-25}{25-23} x(45 - 30) \\ &= 45 \text{ Menit} \geq 45 \text{ Menit (Memenuhi)} \end{aligned}$$

#### 4.2.4. Kerikil (Agregat Kasar)

Rangkaian pengujian pada agregat kasar (kerikil) dilakukan untuk memvalidasi kelayakan fisis material sebelum digunakan dalam campuran beton berpori. Karakterisasi ini meliputi tiga pengujian utama yang menjadi parameter dasar dalam menentukan kualitas serta proporsi material. Tahapan dimulai dengan analisis gradasi (uji saringan) guna mengidentifikasi distribusi ukuran butiran agregat, yang sangat berpengaruh terhadap pembentukan rongga udara dan efektivitas laju infiltrasi air pada beton. Selanjutnya, dilakukan pengujian keausan menggunakan mesin *Los Angeles* untuk mengukur ketahanan mekanis agregat terhadap beban friksi dan abrasi, guna memastikan agregat tidak mudah pecah saat menerima beban layan. Terakhir, pengujian berat jenis dilakukan sebagai data

teknis yang diperlukan dalam kalkulasi perancangan campuran (*mix design*), sehingga volume agregat kasar dalam setiap variasi dapat ditentukan secara presisi. Data hasil pengujian karakteristik agregat kasar tersebut adalah sebagai berikut:

a. Analisa Saringan Agregat Kasar

Agar diperoleh agregat kasar dengan gradasi baik dan memenuhi syarat maka dilakukan percobaan analisa saringan. Maksud dari percobaan ini adalah untuk menentukan kombinasi yang baik. Adapun analisa pembagian butiran terdapat pada Tabel 4.8 berikut.

**Tabel 4. 8** Pemeriksaan Gradasi Kerikil

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertinggal (gr)
19	0
12,5	408,78
9,5	264,45
4,75	319,81
Sisa	0
Jumlah	993,04

Berdasarkan hasil pengujian gradasi, diperoleh data dengan persamaan sebagai

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

Perhitungan:

$$\begin{aligned} 1. \text{ Berat Tertinggal (\%)} &= \frac{\text{Berat tertinggal}}{\text{Berat total}} \times 100\% \\ &= \frac{408,78}{993,04} \times 100\% \\ &= 41,164 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \text{ Berat Kumulatif (\%)} &= \text{Persentase berat tertinggal} + \text{persentase berat} \\ &\text{ tertinggal saringan sebelumnya} \\ &= 41,164\% + 0\% \\ &= 41,164\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \text{ Lolos Kumulatif (\%)} &= 100\% - \text{Persentase Tertinggal} \\ &= 100\% - 41,164\% \\ &= 58,836\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus halus butir} &= \frac{\Sigma \text{Berat Tertinggal Kumulatif}}{100} \\
 &= \frac{208,96}{100} \times 100\% \\
 &= 2,089\%
 \end{aligned}$$

Berikut merupakan rekapitulasi hasil perhitungan gradasi pasir keseluruhan terdapat pada Tabel 4.9 berikut.

**Tabel 4. 9 Hasil Pemeriksaan Gradasi Kerikil**

Ukuran Saringan (mm)	Berat Tertinggal (gr)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persentase Lolos Kumulatif (%)
19	0	0	0	100
12,5	408,78	41,165	41,165	58,835
9,5	264,45	26,63	67,795	32,205
4,75	319,81	32,205	100	0
Sisa	0	0	0	0
Jumlah	993,04	100,00	208,98	

b. Pengujian dengan mesin Los Angeles

Pemeriksaan keausan agregat dengan mesin los angeles dilakukan untuk mengetahui tingkat keausan agregat tersebut, yang dinyatakan dengan perbandingan antara berat bahan aus lolos saringan No.12 terhadap berat semula, dalam persen (%). Berikut pencatatan data yang tersaji dalam Tabel 4.10.

**Tabel 4. 10 Data Keausan**

Jumlah Berat Sample (a)	5000 gr
Berat Tertahan No.12 (b)	3350 gr
Keausan $\frac{a-b}{a} \times 100\%$	$\frac{5000-3350}{5000} \times 100\% = 33 \%$

c. Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar

Untuk mengetahui kualitas dari agregat yang dipakai untuk campuran beton maka harus menguji berat jenis dan penyerapan agregat tersebut. Dimana akan memengaruhi volume agregat dan banyaknya penyerapan terhadap air yang dipakai. Maksud dari pemeriksaan ini adalah untuk mengetahui berapa besar penyerapan agregat terhadap air dan besarnya nilai factor air semen (FAS) dalam campuran beton, sehingga dapat ditentukan volume agregat dan semen yang efisien. Berikut data disajikan dalam pengujian berat jenis agregat kasar yang telah dilakukan pada Tabel 4.11.

**Tabel 4. 11** Pengujian Berat Jenis Kerikil

No.	Pengujian	Berat
1.	Berat benda uji kering oven (BK)	2000 g
2.	Berat benda uji kering permukaan (SSD)	2050 g
3.	Berat benda uji didalam air (BA)	1280 g
4.	Berat Jenis (Bulk) $\frac{BK}{(BJ-BA)}$	2,597
5.	Berat jenis kering permukaan (SSD) $\frac{BJ}{(BJ-BA)}$	2662
6.	Berat jenis semu (App) $\frac{BK}{(BK-BA)}$	2,7
7.	Penyerapan (Absorpsi) $\frac{BJ-BK}{BK} \times 100\%$	2,5%

#### 4.3. Analisis Pengujian Benda Uji

Pengujian terhadap benda uji beton berpori dilakukan untuk mengevaluasi kualitas mekanis sekaligus kemampuan resapan airnya. Kekuatan struktur beton diuji melalui kuat tekan (*compressive strength*) guna mengetahui beban maksimal yang mampu ditahan oleh sampel. Selain itu, dilakukan pengujian porositas untuk menghitung persentase rongga udara di dalam beton, yang mana hasil ini akan sangat menentukan seberapa besar ruang yang tersedia bagi aliran air. Untuk memastikan fungsinya sebagai drainase, laju infiltrasi atau permeabilitas juga diuji untuk mengukur kecepatan air saat meresap menembus struktur beton tersebut. Rangkaian pengujian ini penting dilakukan guna melihat bagaimana pengaruh campuran abu tempurung kelapa dan serbuk sabut kelapa terhadap performa akhir beton berpori, baik dari sisi kekuatan maupun kemampuannya dalam mengalirkan air.

### 4.3.1. Analisis Pengujian Kuat Tekan Beton Berpori

Pengujian kuat tekan dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur Universitas Diponegoro menggunakan mesin *Compression Testing Machine* (CTM) berbasis komputer.

Prosedur pengujian melibatkan tiga benda uji representatif untuk setiap variasi campuran guna memperoleh nilai rata-rata yang akurat dan konsisten. Pengujian ini dilakukan pada hari ke 14 yang mensyaratkan kuat tekan minimal 17 MPa. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan pada umur 14 hari yang telah dilakukan, diperoleh nilai kuat tekan masing-masing benda uji setiap variasi campuran. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton berpori pada umur 14 hari dapat dilihat pada Tabel 4.12.

**Tabel 4. 12** Hasil Pengujian Kuat Tekan

Variasi	Sampel	Kuat Tekan (Mpa)	Rata-rata Kuat Tekan (Mpa)
Kontrol (ATK0-CPT0)	1	4.41	4.70
	2	4.64	
	3	5.04	
ATK2,5-CPT0	1	5.61	5.34
	2	5.15	
	3	5.26	
ATK2,5-CPT5	1	4.81	4.00
	2	3.51	
	3	3.68	
ATK2,5-CPT10	1	3.96	3.55
	2	3.68	
	3	3.00	
ATK2,5-CPT15	1	3.51	3.19
	2	3.28	
	3	2.77	

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan pada umur 14 hari, variasi ATK0-CPT0 sebagai *paving porous* konvensional menunjukkan kuat tekan rata-rata sebesar 4,70 MPa. Nilai tersebut diperoleh dari tiga benda uji dengan hasil masing-masing 4,41 MPa, 4,64 MPa, dan 5,04 MPa. Sementara itu, pada variasi ATK2,5-CPT0 terjadi peningkatan signifikan diperoleh kuat tekan rata-rata sebesar 5,34 MPa atau naik sebesar 13,62% dibandingkan variasi kontrol, yang berasal dari hasil

pengujian masing-masing 5,61 MPa, 5,15 MPa, dan 5,26 Mpa. Pada variasi ATK2,5-CPT5 terjadi penurunan kuat tekan dengan nilai rata-rata sebesar 4,00 MPa atau turun sebesar 25,09% dibandingkan variasi ATK2,5-CPT0, berdasarkan hasil 4,81 MPa, 3,51 MPa, dan 3,68 MPa. Nilai kuat tekan menunjukkan penurunan tren pada variasi ATK2,5-CPT10 dan ATK2,5-CPT15 dengan rata-rata sebesar 3,55 Mpa dan 3,19 Mpa. Nilai kuat tekan pada umur 28 hari dapat ditentukan melalui perhitungan berdasarkan pada ketentuan konnversi beton PBI-1971 dalam memperoleh estimasi kekuatan maksimum. Pada perhitungan tersebut digunakan data hasil pengujian pada umur 14 hari, yang kemudian diolah dengan persamaan sebagai berikut. Adapun angka konversi umur beton yang digunakan sebagai dasar perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.13.

**Tabel 4. 13** 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:

$\rho$  : Beban tekan maksimum (N)

A : Luas Penampang (mm<sup>2</sup>)

Variasi ATK0-CPT0

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Sampel 1} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{78000}{17663} \\
 &= 4,41 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2. \text{ Sampel 2} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{82000}{17663} \\
 &= 4,64
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3. \text{ Sampel 3} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{89000}{17663} \\
 &= 5,04
 \end{aligned}$$

Rata-rata kuat tekan Variasi ATK0-CPT0 umur 14 hari adalah:

$$\begin{aligned}
 \text{Rata-rata 14 hari} &= \frac{4,41+4,64+5,04}{3} \\
 &= 4,70 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

Maka, hasil kuat tekan pada umur 28 hari adalah:

$$\begin{aligned}
 \text{Konversi 28 hari} &= \frac{\text{Rata-rata kuat tekan umur 14 hari}}{\text{Angka Konversi}} \\
 &= \frac{4,70}{0,88} \\
 &= 5,34 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

Variasi ATK2,5-CPT0

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Sampel 1} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{99000}{17663} \\
 &= 5,61 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2. \text{ Sampel 2} &= \frac{\rho}{A} \\
 &= \frac{91000}{17663}
 \end{aligned}$$

$$= 5,15 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} 3. \text{ Sampel 3} &= \frac{\rho}{A} \\ &= \frac{93000}{17663} \\ &= 5,26 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Rata-rata kuat tekan Variasi ATK2,5-CPT0 umur 14 hari adalah:

$$\begin{aligned} \text{Rata-rata 14 hari} &= \frac{5,61+5,15+5,26}{3} \\ &= 5,34 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Maka, hasil kuat tekan pada umur 28 hari adalah:

$$\begin{aligned} \text{Konversi 28 hari} &= \frac{\text{Rata-rata kuat tekan umur 14 hari}}{\text{Angka Konversi}} \\ &= \frac{5,34}{0,88} \\ &= 6,07 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Variasi ATK2,5-CPT5

$$\begin{aligned} 1. \text{ Sampel 1} &= \frac{\rho}{A} \\ &= \frac{85000}{17663} \\ &= 4,81 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \text{ Sampel 2} &= \frac{\rho}{A} \\ &= \frac{62000}{17663} \\ &= 3,51 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$3. \text{ Sampel 3} = \frac{\rho}{A}$$

$$= \frac{65000}{17663}$$

$$= 3,68 \text{ MPa}$$

Rata-rata kuat tekan Variasi ATK2,5-CPT5 umur 14 hari adalah:

$$\text{Rata-rata 14 hari} = \frac{4,81+3,51+3,68}{3}$$

$$= 4,00 \text{ Mpa}$$

Maka, hasil kuat tekan pada umur 28 hari adalah:

$$\text{Konversi 28 hari} = \frac{\text{Rata-rata kuat tekan umur 14 hari}}{\text{Angka Konversi}}$$

$$= \frac{4,00}{0,88}$$

$$= 4,55 \text{ Mpa}$$

Variasi ATK2,5-CPT10

$$1. \text{ Sampel 1} = \frac{\rho}{A}$$

$$= \frac{70000}{17663}$$

$$= 3,96 \text{ MPa}$$

$$2. \text{ Sampel 2} = \frac{\rho}{A}$$

$$= \frac{65000}{17663}$$

$$= 3,68 \text{ MPa}$$

$$3. \text{ Sampel 3} = \frac{\rho}{A}$$

$$= \frac{53000}{17663}$$

$$= 3,00 \text{ MPa}$$

Rata-rata kuat tekan Variasi ATK2,5-CPT10 umur 14 hari adalah:

$$\text{Rata-rata 14 hari} = \frac{3,96+3,68+3,00}{3}$$

$$= 3,55 \text{ Mpa}$$

Maka, hasil kuat tekan pada umur 28 hari adalah:

$$\text{Konversi 28 hari} = \frac{\text{Rata-rata kuat tekan umur 14 hari}}{\text{Angka Konversi}}$$

$$= \frac{3,55}{0,88}$$

$$= 4,03 \text{ Mpa}$$

Variasi ATK2,5-CPT15

$$\begin{aligned} 1. \text{ Sampel 1} &= \frac{\rho}{A} \\ &= \frac{62000}{17663} \\ &= 3,51 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \text{ Sampel 2} &= \frac{\rho}{A} \\ &= \frac{58000}{17663} \\ &= 3,28 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3. \text{ Sampel 3} &= \frac{\rho}{A} \\ &= \frac{49000}{17663} \\ &= 2,77 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Rata-rata kuat tekan Variasi ATK2,5-CPT15 umur 14 hari adalah:

$$\text{Rata-rata 14 hari} = \frac{3,51+3,28+2,77}{3}$$

$$= 3,19 \text{ Mpa}$$

Maka, hasil kuat tekan pada umur 28 hari adalah:

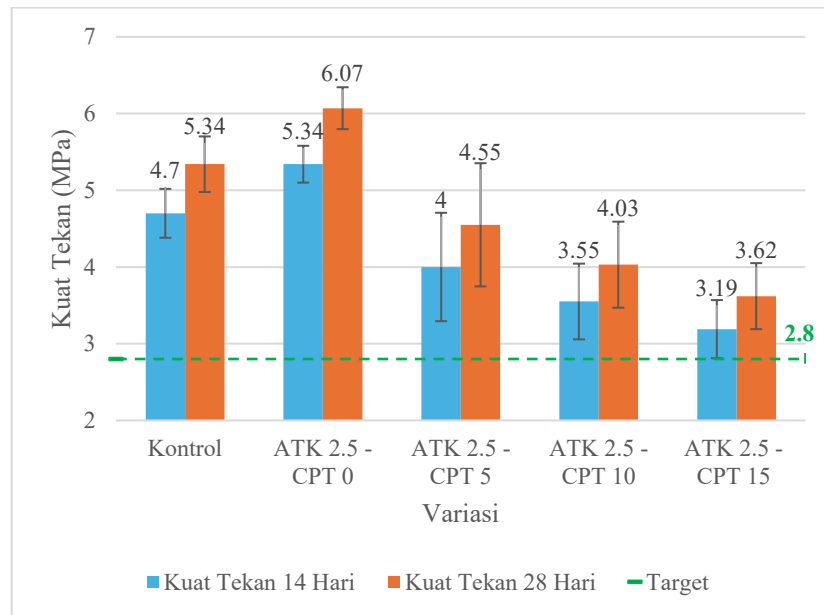
$$\begin{aligned} \text{Konversi 28 hari} &= \frac{\text{Rata-rata kuat tekan umur 14 hari}}{\text{Angka Konversi}} \\ &= \frac{3,19}{0,88} \\ &= 3,62 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Nilai kuat tekan pada umur 28 hari diperoleh melalui proses konversi dari hasil pengujian umur 14 hari menggunakan angka konversi sebesar 0,88. Rekapitulasi hasil konversi kuat tekan beton berpori pada umur 28 hari untuk masing-masing variasi campuran dapat dilihat pada Tabel 4.14.

**Tabel 4. 14** Hasil Kuat Tekan Umur 28 Hari

Variasi	Umur (Hari)	Rata-Rata Kuat Tekan (Mpa)
ATK0-CPT0	28	5,34
ATK2,5-CPT0	28	6,07
ATK2,5-CPT5	28	4,55
ATK2,5-CPT10	28	4,03
ATK2,5-CPT15	28	3,62

Data rata-rata kuat tekan pada Tabel 4.14 kemudian disajikan dalam bentuk grafik agar perbedaan nilai kuat tekan antar variasi campuran dapat diamati dengan lebih jelas. Perbandingan rata-rata kuat tekan pada umur 14 hari dan 28 hari ditunjukkan pada Grafik 4.1.



**Grafik 4. 1** Rata-rata Kuat Tekan

Berdasarkan Grafik 4.1 diatas yang merupakan perbandingan antara rata-rata kuat tekan beton berpori pada umur 14 hari dengan umur 28 hari, menunjukkan bahwa seluruh variasi yang mendapat campuran bahan tambah pada pengujian ini mengalami peningkatan nilai kuat tekan. Dan diketahui bahwa penambahan abu tempurung kelapa dan serbuk sabut kelapa sebagai bahan tambah mampu meningkatkan nilai kuat tekan dibandingkan variasi kontrol (Hardini dkk., 2021). Variasi ATK0-CPT0 sebagai campuran normal menunjukkan nilai kuat tekan awal, sedangkan pada variasi berikutnya yang menggunakan tambahan abu tempurung kelapa sebesar 2,5% terjadi peningkatan kuat tekan. Peningkatan paling signifikan terjadi pada Variasi ATK2,5-CPT0 dan ATK2,5-CPT5, yaitu pada penambahan serbuk sabut kelapa sebesar 0% dan 5%, yang menunjukkan bahwa kombinasi abu tempurung kelapa dalam jumlah kecil dengan serbuk sabut kelapa mampu memperbaiki ikatan antar material pada *paving* pori. Abu tempurung kelapa berperan sebagai material pozzolan yang membantu pembentukan senyawa pengikat tambahan sehingga struktur *paving* menjadi lebih padat dan kuat (Hardini dkk., 2021). Sementara itu, penambahan serbuk sabut kelapa dalam kadar rendah masih mampu membantu memperkuat matriks beton tanpa menurunkan kepadatan campuran secara signifikan (Suhendro dkk., 2019).

Namun, pada Variasi ATK2,5-CPT10 dan ATK2,5-CPT15 dengan penambahan serbuk sabut kelapa sebesar 10% dan 15%, nilai kuat tekan mulai mengalami penurunan dibanding Variasi ATK2,5-CPT0 dan ATK2,5-CPT5. Hal ini disebabkan karena kandungan serat yang terlalu banyak dapat meningkatkan rongga dan porositas campuran sehingga ikatan antar partikel menjadi kurang optimal (Putra dkk., 2022). Walaupun demikian, nilai kuat tekan pada variasi tersebut masih lebih baik dibanding variasi kontrol. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan abu tempurung kelapa sebesar 2,5% dan serbuk sabut kelapa sebesar 5% merupakan variasi paling optimal dalam meningkatkan kuat tekan *paving* pori.

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, seluruh variasi *paving porous* yang dihasilkan belum mampu mencapai angka 17 MPa (target mutu B/C berdasarkan SNI 03-0691-1996 untuk *paving* normal). Penurunan nilai kuat tekan ini merupakan hal yang sangat wajar dan sudah diprediksi sebelumnya, mengingat karakteristik dasar dari perkerasan berpori (*pervious concrete*) yang sangat berbeda dengan perkerasan beton konvensional.

*Paving* konvensional yang menargetkan 17 MPa mengandalkan kepadatan matriks yang diisi penuh oleh agregat halus (pasir) untuk mendistribusikan beban. Sebaliknya, *paving porous* secara sengaja mengurangi agregat halus untuk menciptakan sistem interkoneksi rongga (pori makro) guna meloloskan air. Menurut (Chandrappa & Biligiri, 2016), terdapat korelasi terbalik antara porositas dan sifat mekanis beton berpori; semakin tinggi tingkat permeabilitas dan porositas yang dirancang, maka secara alamiah akan terjadi penurunan drastis pada nilai kuat tekannya akibat hilangnya matriks pengisi struktural. Pernyataan serupa juga dijelaskan oleh ACI Committee 522 (2010) yang menyebutkan bahwa peningkatan rongga pada beton berpori akan menurunkan kapasitas menahan beban tekan karena berkurangnya luas kontak antar agregat.

Meskipun tidak mencapai 17 MPa, evaluasi kelayakan *paving porous* ini perlu ditinjau menggunakan parameter standar yang berbeda. Standar 17 MPa (SNI 03-0691-1996) diperuntukkan bagi *paving block* pejal. Untuk *paving porous*, standar internasional yang lazim digunakan adalah ACI 522R-10 (*Report on Pervious*

*Concrete*). Menurut ACI (2010), kuat tekan beton berpori secara umum berada pada rentang 2,8 MPa hingga 28 MPa tergantung pada rasio rongganya dan tergantung penggunaannya. Untuk aplikasi beban ringan (pedestrian, taman, lahan parkir ringan), nilai kuat tekan di kisaran 3 MPa hingga 15 MPa sudah dianggap sangat wajar dan dapat diterima (ACI Committee 522, 2010). Oleh karena itu, nilai kuat tekan variasi *paving* pada penelitian ini masih berada di dalam rentang rekomendasi tersebut, material ini dinilai telah berhasil memenuhi kriteria fungsionalnya sebagai perkerasan ramah lingkungan untuk area dengan beban lalu lintas ringan (seperti *pedestrian* atau taman).

#### 4.3.2. Analisis Pengujian Daya Serap

Pengujian absorpsi atau daya serap air dilakukan guna mengevaluasi pengaruh penggunaan arang tempurung kelapa sebagai bahan substitusi parsial terhadap karakteristik porositas beton berpori. Analisis ini bertujuan untuk mengukur kapasitas penyerapan air pada material, yang berfungsi sebagai indikator tingkat kepadatan serta durabilitas benda uji.

Prosedur pengujian melibatkan tiga buah benda uji pada setiap variasi untuk menjamin validitas dan konsistensi data. Pengujian dilaksanakan saat benda uji mencapai umur 14 hari guna mengamati perkembangan karakteristik fisik material selama proses hidrasi. Analisis data daya serap air dilakukan dengan mengacu pada formulasi yang ditetapkan dalam SNI 03-0349-1989, dengan rincian perhitungan yang 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)

Sebelum nilai daya serap air dihitung, setiap benda uji terlebih dahulu ditimbang dalam kondisi jenuh air (berat basah) dan setelah dikeringkan (berat

kering). Hasil penimbangan benda uji pada masing-masing variasi campuran disajikan pada Tabel 4.15.

**Tabel 4. 15** Berat Hasil pada Pengujian Daya Serap Air

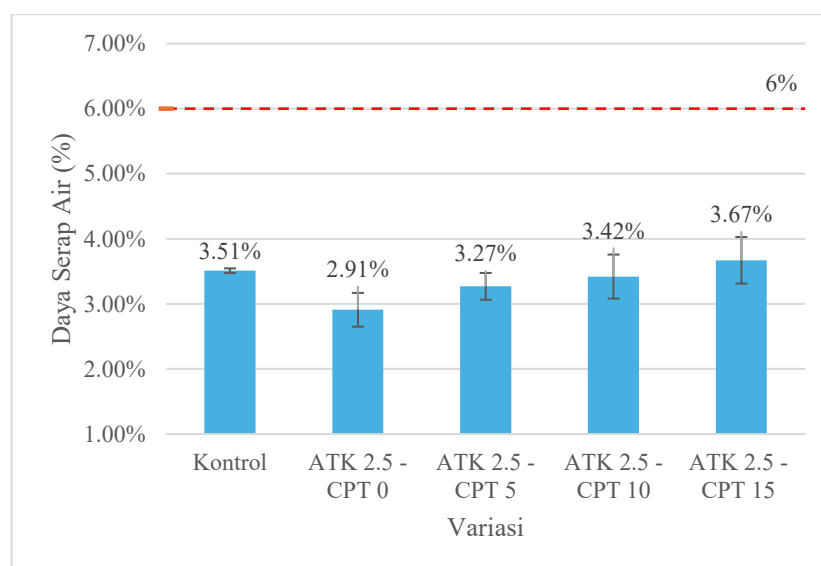
Variasi	Sampel	Berat Basah (A) (gram)	Berat Kering (B) (gram)
Kontrol ATK0-CPT0	1	2090	2020
	2	1910	1845
	3	1755	1695
ATK2,5-CPT0	1	2100	2045
	2	2005	1950
	3	1940	1880
ATK2,5-CPT5	1	2075	2005
	2	2010	1950
	3	1905	1845
ATK2,5-CPT10	1	1920	1855
	2	1865	1810
	3	1820	1755
ATK2,5-CPT15	1	1945	1880
	2	1935	1870
	3	1910	1835

Berdasarkan data berat basah dan berat kering pada Tabel 4.15, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai daya serap air untuk setiap benda uji. Nilai daya serap air dan rata-rata daya serap air pada masing-masing variasi campuran disajikan pada Tabel 4.16.

**Tabel 4. 16** Hasil Pengujian Daya Serap Air

Variasi	Sampel	Berat Basah (A)	Berat Kering (B)	Hasil Penyerapan Air (%)	Rata-Rata Penyerapan Air (%)
Kontrol ATK0-CPT0	1	2090	2020	3.47	3.51
	2	1910	1845	3.52	
	3	1755	1695	3.54	
ATK2,5-CPT0	1	2100	2045	2.69	2.90
	2	2005	1950	2.82	
	3	1940	1880	3.19	
ATK2,5-CPT5	1	2075	2005	3.49	3.27
	2	2010	1950	3.08	
	3	1905	1845	3.25	
ATK2,5-CPT10	1	1920	1855	3.50	3.42
	2	1865	1810	3.04	
	3	1820	1755	3.70	
ATK2,5-CPT15	1	1945	1880	3.46	3.67
	2	1935	1870	3.48	
	3	1910	1835	4.09	

Data rata-rata daya serap air pada Tabel 4.16 selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik untuk memudahkan perbandingan antar variasi campuran. Grafik 4.2 menunjukkan rata-rata nilai daya serap air *paving porous* pada setiap variasi penggunaan abu tempurung kelapa dan *cocopeat*.

**Grafik 4. 2** Rata-rata Daya Serap Air

Berdasarkan hasil pengujian daya serap air pada *paving* berpori ukuran  $20 \times 10 \times 6$  cm, diperoleh nilai rata-rata daya serap air pada variasi ATK0-CPT0 sebesar 3,51%, variasi ATK2,5-CPT0 sebesar 2,90%, variasi ATK2,5-CPT5 sebesar 3,27%, variasi ATK2,5-CPT10 sebesar 3,42%, dan variasi ATK2,5-CPT15 sebesar 3,67%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai daya serap air mengalami penurunan dari variasi ATK0-CPT0 hingga mencapai nilai optimum pada variasi ATK2,5-CPT0, kemudian kembali meningkat pada variasi ATK2,5-CPT5, ATK2,5-CPT10, dan ATK2,5-CPT15. Perubahan tren tersebut dipengaruhi oleh penambahan abu tempurung kelapa sebesar 2,5% dan variasi kadar serbuk sabut kelapa yang berbeda pada setiap campuran.

Penurunan daya serap air yang paling signifikan pada variasi ATK2,5-CPT0 terjadi karena abu tempurung kelapa memiliki kandungan silika ( $\text{SiO}_2$ ) yang cukup tinggi dan bersifat pozzolanik, sehingga mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen untuk membentuk senyawa tambahan berupa kalsium silikat hidrat (C-S-H) (Senhadji dkk., 2014). Senyawa ini membantu mengisi rongga-rongga kecil pada campuran *paving* sehingga struktur menjadi lebih padat dan pori yang terbentuk menjadi lebih sedikit. Fenomena ini diperkuat oleh teori bahwa produk sekunder dari reaksi pozzolanik tidak hanya mengikat material secara kimiawi, tetapi juga memberikan efek pengisi mikro (*micro-filler effect*) yang menyempitkan dan memutus konektivitas jaringan pori kapiler di dalam matriks semen, sehingga secara langsung menghambat penetrasi air (Khankhaje dkk., 2016). Selain itu, penambahan serbuk sabut kelapa sebesar 2,5% pada Variasi ATK2,5-CPT0 berada pada kondisi optimum, di mana serat yang terkandung mampu membantu memperkuat ikatan antar material tanpa meningkatkan rongga secara berlebihan. Kondisi tersebut menyebabkan air yang masuk ke dalam *paving* menjadi lebih sedikit sehingga nilai daya serap air menurun hingga mencapai nilai terendah pada Variasi ATK2,5-CPT0 sebesar 2,90%.

Namun, pada Variasi ATK2,5-CPT5, ATK2,5-CPT10, dan ATK2,5-CPT15 terjadi peningkatan kembali nilai daya serap air menjadi 3,27%, 3,42%, dan 3,67%. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya jumlah serbuk sabut kelapa (mulai dari 5%, 10%, hingga 15%) yang membuat campuran menjadi lebih berpori dan kurang

padat. Serbuk sabut kelapa mengandung serat alami dengan kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang memiliki sifat menyerap air (hidroskopis). Pada kadar yang semakin tinggi, serat sabut kelapa dapat membentuk rongga-rongga tambahan di dalam *paving* serta meningkatkan kemampuan material menyimpan air. Akibatnya, air lebih mudah masuk dan terserap ke dalam struktur *paving*. Selain itu, distribusi campuran menjadi kurang homogen karena volume serat yang terlalu banyak dapat menghambat proses pemadatan *paving* berpori.

Variasi ATK0-CPT0 sebagai campuran kontrol memiliki daya serap air lebih tinggi dibanding Variasi ATK2,5-CPT0 karena belum terdapat tambahan abu tempurung kelapa yang membantu memperbaiki kerapatan struktur campuran. Sementara itu, Variasi ATK2,5-CPT0 menunjukkan hasil paling optimum karena kombinasi abu tempurung kelapa 2,5% mampu menghasilkan keseimbangan terbaik antara pembentukan pori pada *paving* berpori dan kepadatan struktur campuran. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penambahan abu tempurung kelapa dan serbuk sabut kelapa dalam kadar tertentu dapat menurunkan daya serap air *paving* berpori, tetapi penggunaan serbuk sabut kelapa yang melebihi kadar optimal tersebut justru meningkatkan daya serap akibat bertambahnya rongga dan sifat alami serat yang mudah menyerap air.

#### 4.3.3. Analisis Pengujian Porositas

Uji porositas pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana *paving block* tersebut mampu meresapkan air melalui pori-pori dalam struktur materialnya. Material limbah organik seperti abu tempurung kelapa dan serbuk sabut kelapa diharapkan dapat meningkatkan jumlah rongga dalam beton, sehingga berpengaruh terhadap nilai porositas tanpa mengorbankan kekuatan mekanisnya. Pengujian porositas dilaksanakan dengan maksimal porositas sebesar 10%, berdasarkan ASTM C 642-90. Dengan hasil yang dicapai dijabarkan dalam persamaan berikut:

$$n = \frac{C - A}{C - D}$$

Keterangan:

n : Porositas Benda Uji (%)

A : Berat Kering Oven Benda Uji (gram)

C : Berat Benda Uji Jenuh Air Setelah Pendidihan (gram)

D : Berat Benda Uji Dalam Air (gram)

Setelah proses perendaman dan penimbangan benda uji selesai dilakukan, diperoleh data berat basah (C), berat kering (A), dan berat benda uji dalam air (D) yang digunakan sebagai dasar perhitungan nilai porositas *paving porous*. Hasil pengukuran berat benda uji pada masing-masing variasi campuran disajikan pada Tabel 4.17.

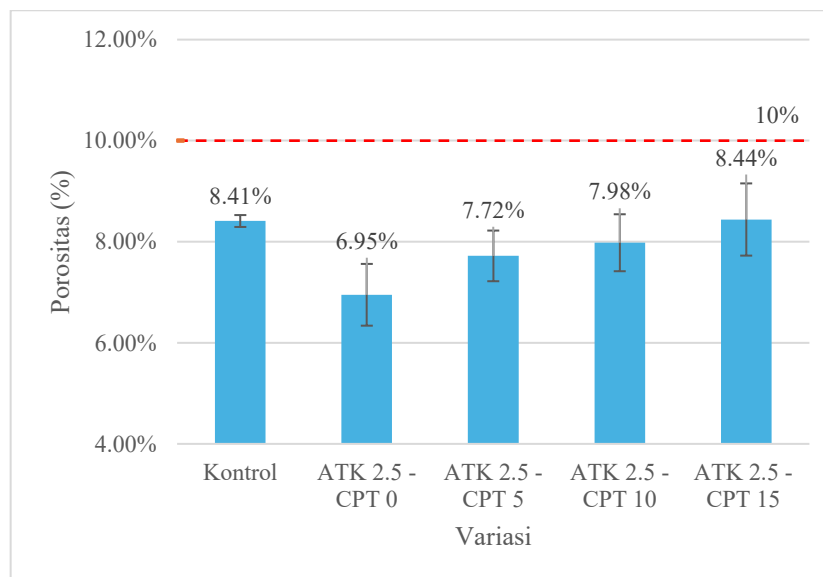
**Tabel 4. 17** Berat Hasil Pengujian Porositas

Variasi	Sampel	Berat Basah (C) (gram)	Berat Kering (A) (gram)	Berat Dalam Air (D) (gram)
Kontrol ATK0-CPT0	1	2090	2020	1245
	2	1910	1845	1140
	3	1755	1695	1050
ATK2,5-CPT0	1	2100	2045	1250
	2	2005	1950	1190
	3	1940	1880	1155
ATK2,5-CPT5	1	2075	2005	1230
	2	2010	1950	1190
	3	1905	1845	1110
ATK2,5-CPT10	1	1920	1855	1140
	2	1865	1810	1115
	3	1820	1755	1035
ATK2,5-CPT15	1	1945	1880	1130
	2	1935	1870	1130
	3	1910	1835	1100

Nilai porositas setiap benda uji serta rata-rata porositas pada masing-masing variasi campuran disajikan pada Tabel 4.18. Data rata-rata porositas pada Tabel 4.18 selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik untuk memudahkan pengamatan terhadap perbedaan nilai porositas pada setiap variasi campuran. Perbandingan rata-rata nilai porositas *paving porous* dapat dilihat pada Grafik 4.3.

**Tabel 4. 18** Hasil Pengujian Porositas

Variasi	Sampel	Nilai Porositas (n)	Rata-Rata Nilai Porositas (%)
Kontrol ATK0-CPT0	1	8.28%	8.41%
	2	8.44%	
	3	8.51%	
ATK2,5-CPT0	1	6.47%	6.95%
	2	6.75%	
	3	7.64%	
ATK2,5-CPT5	1	8.28%	7.72%
	2	7.32%	
	3	7.55%	
ATK2,5-CPT10	1	8.33%	7.98%
	2	7.33%	
	3	8.28%	
ATK2,5-CPT15	1	7.98%	8.44%
	2	8.07%	
	3	9.26%	

**Grafik 4. 3** Hasil Rata-rata Porositas

Hasil pengujian porositas pada *paving* berpori ukuran  $20 \times 10 \times 6$  cm menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran masih berada di bawah batas maksimum porositas sebesar 10%, sehingga *paving* yang dihasilkan masih memenuhi kriteria yang diharapkan. Nilai porositas yang diperoleh pada Variasi ATK0-CPT0 sebesar 8,41%, Variasi ATK2,5-CPT0 sebesar 6,95%, Variasi ATK2,5-CPT5 sebesar 7,72%, Variasi ATK2,5-CPT10 sebesar 7,98%, dan Variasi ATK2,5-

CPT15 sebesar 8,44%. Dari hasil tersebut terlihat bahwa nilai porositas mengalami penurunan dari Variasi ATK0-CPT0 hingga mencapai nilai terendah pada Variasi ATK2,5-CPT0, kemudian kembali meningkat secara bertahap pada Variasi ATK2,5-CPT5, ATK2,5-CPT10, dan ATK2,5-CPT15.

Menurunnya nilai porositas yang paling signifikan pada Variasi ATK2,5-CPT0 (6,95%) dipengaruhi oleh penambahan abu tempurung kelapa sebesar 2,5% tanpa adanya penambahan serbuk sabut kelapa (0%), yang mampu memperbaiki kepadatan struktur *paving*. Abu tempurung kelapa memiliki kandungan silika ( $\text{SiO}_2$ ) yang bersifat pozzolanik sehingga dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen dan membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) (Sikana dkk., 2025). Senyawa tersebut bertindak sebagai *filler* (pengisi) yang membantu mengisi rongga-rongga kecil pada campuran sehingga jumlah pori dalam matriks *paving* menjadi lebih sedikit (Khankhaje dkk., 2016). Oleh sebab itu, Variasi ATK2,5-CPT0 menghasilkan nilai porositas paling rendah yaitu 6,95%.

Namun, seiring dengan penambahan serbuk sabut kelapa (*cocopeat*) pada campuran selanjutnya, nilai porositas kembali meningkat. Pada Variasi ATK2,5-CPT5 (7,72%), penambahan serbuk sabut kelapa sebesar 5% mulai memberikan rongga tambahan di dalam struktur *paving*. Kenaikan nilai porositas ini terus berlanjut pada Variasi ATK2,5-CPT10 (7,98%) dan Variasi ATK2,5-CPT15 (8,44%) akibat meningkatnya kadar serbuk sabut kelapa menjadi 10% dan 15%. Kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada serbuk sabut kelapa memiliki sifat ringan, berpori, dan tidak sepadat pasir agregat halus (Rahmawati dkk., 2023), sehingga pada jumlah yang lebih tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi kurang padat. Banyaknya partikel organik dalam campuran juga dapat menghambat proses pemadatan saat pencetakan *paving* (Kusuma dkk., 2021), sehingga terbentuk lebih banyak rongga udara makro di dalam material. Akibatnya, jumlah pori meningkat dan nilai porositas menjadi lebih tinggi. Pada Variasi ATK2,5-CPT15, nilai porositas bahkan mencapai 8,44%, sedikit lebih tinggi dibanding Variasi ATK0-CPT0 sebagai campuran kontrol.

Variasi ATK0-CPT0 memiliki nilai porositas cukup tinggi karena belum terdapat tambahan abu tempurung kelapa yang dapat membantu memperbaiki

struktur dan mengurangi rongga campuran. Sementara itu, Variasi ATK2,5-CPT0 mencatatkan nilai porositas paling rendah karena substitusi abu tempurung kelapa 2,5% bekerja optimal dalam memadatkan struktur mikro *paving* tanpa adanya gangguan serbuk sabut kelapa. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan abu tempurung kelapa sebagai pengisi mampu menurunkan nilai

porositas *paving* berpori secara efektif. Akan tetapi, penggunaan substitusi serbuk sabut kelapa (seperti pada Variasi ATK2,5-CPT5, ATK2,5-CPT10, dan ATK2,5-CPT15) akan kembali meningkatkan persentase porositas seiring dengan bertambahnya kadar *cocopeat* yang digunakan, diakibatkan oleh karakteristik

bawaan serabut kelapa yang berongga dan menghambat pemadatan, tetapi penggunaan serbuk sabut kelapa yang terlalu tinggi justru meningkatkan porositas akibat bertambahnya rongga di dalam campuran.

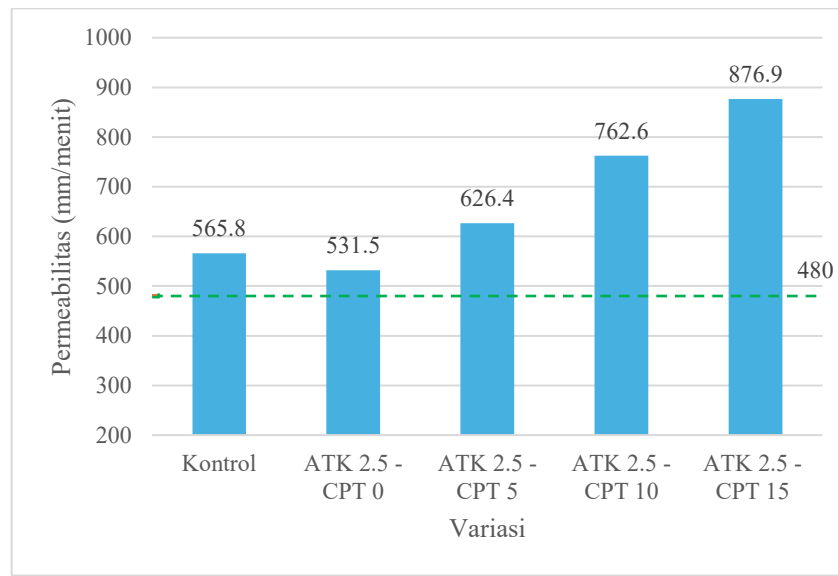
#### 4.3.4. Analisis Pengujian Permeabilitas

Pengujian ini merujuk pada standar ASTM C1701 / C1701M (*Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*). Metode ini dilakukan dengan memasang sebuah cincin silinder (ring infiltrasi) di atas permukaan *paving*, pengujian kemudian dilanjutkan dengan menuangkan air ke dalam cincin infiltrasi dan mengukur waktu yang diperlukan hingga air sepenuhnya meresap melalui permukaan *paving porous*. Berdasarkan data volume air dan waktu infiltrasi tersebut, nilai permeabilitas dihitung untuk setiap variasi campuran. Hasil pengujian permeabilitas disajikan pada Tabel 4.19.

**Tabel 4. 19** Hasil Pengujian Permeabilitas

Variasi	Volume Air (L)	Waktu Infiltrasi (detik)	Nilai Permeabilitas (mm/menit)
Kontrol ATK0-CPT0	18	31	565,8
ATK2,5-CPT0	18	33	531,5
ATK2,5-CPT5	18	28	626,4
ATK2,5-CPT10	18	23	762,6
ATK2,5-CPT15	18	20	876,9

Data hasil pengujian permeabilitas pada Tabel 4.19 selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik untuk memudahkan perbandingan nilai permeabilitas antar variasi campuran. Grafik 4.4 menunjukkan pengaruh penggunaan abu tempurung kelapa dan *cocopeat* terhadap kemampuan *paving porous* dalam meloloskan air.



**Grafik 4. 4** Hasil Pengujian Permeabilitas

Analisis terhadap data hasil pengujian menunjukkan adanya tren kenaikan nilai permeabilitas yang signifikan, terutama pada variasi ATK2,5-CPT10 dan ATK2,5-CPT15. Variasi ATK2,5-CPT0 mencatatkan nilai terendah sebesar 531,5 mm/menit, sedangkan nilai tertinggi dicapai oleh variasi ATK2,5-CPT15 dengan laju 876,9 mm/menit. Pada Variasi ATK2,5-CPT0, terlihat penurunan laju permeabilitas menjadi 531,5 mm/menit dibandingkan dengan Variasi ATK0-CPT0 Kontrol (565,8 mm/menit). Hal ini disebabkan oleh karakteristik Abu Tempurung Kelapa yang memiliki butiran sangat halus. Sebagai substitusi semen, ATK berfungsi sebagai *filler* (pengisi) yang masuk ke dalam pori-pori mikro matriks pasta (Sikanna dkk., 2025). Hal ini menyebabkan struktur beton menjadi lebih rapat dan sedikit mengurangi volume rongga udara yang tersedia untuk aliran air (Khankhaje dkk., 2016). Tren menarik terlihat pada Variasi ATK2,5-CPT5, ATK2,5-CPT10, dan ATK2,5-CPT15, di mana nilai permeabilitas meningkat secara linear seiring dengan bertambahnya persentase *Cocopeat*. Nilai tertinggi dicapai

oleh Variasi ATK2,5-CPT15 dengan laju 876,9 mm/menit. Peningkatan drastis ini dipicu oleh penggantian pasir dengan *Cocopeat*.

Berbeda dengan pasir yang memiliki densitas tinggi dan sifat padat, *Cocopeat* adalah material organik yang bersifat porous (berpori) dan memiliki volume yang besar namun ringan (Ali dkk., 2012). Kehadiran *Cocopeat* dalam campuran menyebabkan peningkatan interkoneksi pori. Sifat *Cocopeat* yang tidak sepadat pasir menciptakan jalur-jalur air yang lebih terbuka di dalam struktur *paving* dan ketidaksempurnaan ikatan matriks (Rahmawati dkk., 2024b) penambahan serat atau serbuk *Cocopeat* dalam jumlah besar cenderung mengganggu kepadatan mortar, sehingga menciptakan rongga makro (*macropores*) yang lebih banyak (Danso dkk., 2016)

Secara keseluruhan, meskipun Variasi ATK2,5-CPT0 mengalami sedikit penurunan, seluruh variasi (A-E) tetap memiliki performa drainase yang sangat tinggi. Merujuk pada standar ACI 522R-10, laju infiltrasi minimum untuk perkerasan porus umumnya berkisar antara 120–480 mm/menit (ACI Committee 522, 2010). Dengan hasil terendah sebesar 531,5 mm/menit, maka *paving porous* dengan substitusi ATK dan CPT ini sangat efektif untuk diaplikasikan pada area resapan air hujan guna meminimalisir genangan (*runoff*). Namun, perlu diperhatikan bahwa semakin tinggi nilai permeabilitas, biasanya akan berbanding terbalik dengan nilai kuat tekan material, karena bertambahnya volume rongga udara di dalam struktur (Mayasari dkk., 2022).

#### 4.3.5. Analisis Pengujian *Cantabro Loss*

Pelaksanaan pengujian merujuk pada standar baku ASTM C1747 / C1747M. Prinsip kerja pengujian ini adalah memutar benda uji (spesimen) di dalam drum silinder mesin *Los Angeles Abrasion* tanpa menggunakan bola baja pejal, kemudian menghitung persentase massa spesimen yang terkelupas atau hancur setelah menerima sejumlah putaran tertentu. Besarnya nilai persentase kehilangan massa (*Cantabro Loss*) dihitung menggunakan persamaan empiris berikut:

$$\text{Cantabro Loss (CL)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\%$$

Keterangan:

CL = Persentase Kehilangan Berat / *Cantabro Loss (%)*

$M_1$  = Massa benda uji awal sebelum dimasukkan ke dalam mesin *Los Angeles* (gram)

$M_2$  = Massa benda uji akhir setelah dikeluarkan dari mesin dan dibersihkan dari serpihan rontokan (gram)

Setelah pengujian *cantabro loss* selesai dilakukan setiap benda uji ditimbang sebelum dan sesudah proses abrasi untuk mengetahui besarnya massa yang hilang akibat putaran dalam mesin *los angeles*. Hasil pengukuran berat awal, berat akhir, dan kehilangan berat benda uji disajikan pada Tabel 4.20.

**Tabel 4. 20** Hasil Pengujian *Cantabro Loss*

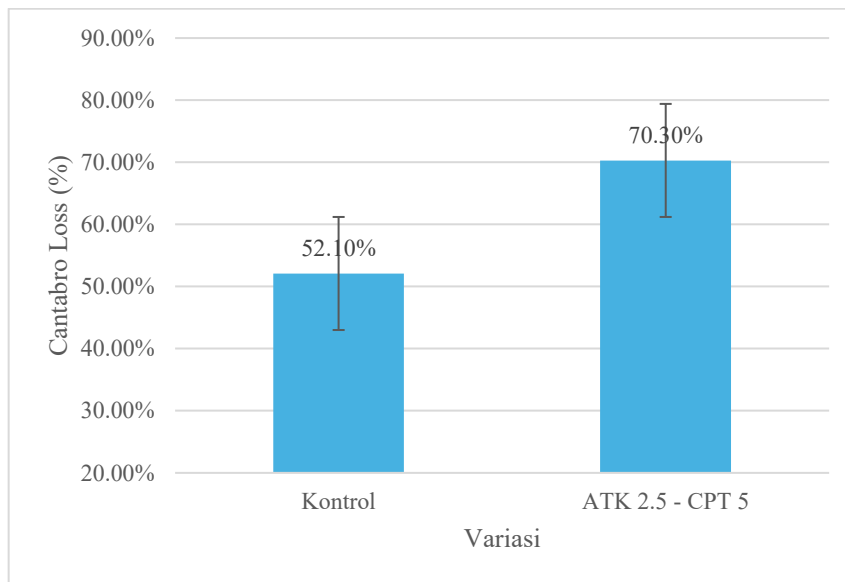
Variasi	Sampel	Berat Awal (g)	Berat Akhir (g)	Kehilangan Berat (g)
Kontrol ATK0-CPT0	1	1965	845	1120
	2	2000	1105	895
	3	1815	820	995
ATK 2,5-CPT5	1	1955	440	1515
	2	1830	560	1270
	3	2220	795	1425

Data kehilangan berat kemudian digunakan untuk menghitung nilai *cantabro loss* pada masing-masing sampel, Hasil perhitungan nilai *cantabro loss* dan rata-rata setiap variasi campuran dapat dilihat pada Tabel 4.21.

**Tabel 4. 21** Hasil Pengujian Rata-rata *Cantabro Loss*

Variasi	Sampel	Cantabro loss (%)	Rata-rata (%)
Kontrol ATK0-CPT0	1	56,9	52,1
	2	44,7	
	3	54,8	
ATK 2,5-CPT5	1	77,4	70,3
	2	69,4	
	3	64,2	

Data rata-rata nilai *Cantabro Loss* pada Tabel 4.21 selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik untuk memudahkan pengamatan terhadap perbedaan ketahanan abrasi antar variasi campuran. Grafik 4.5 menunjukkan perbandingan rata-rata nilai *Cantabro Loss* pada setiap variasi *paving porous* yang diuji.



**Grafik 4. 5** Hasil Pengujian Cantabro

Berdasarkan data di atas, terlihat kenaikan nilai kehilangan massa yang cukup signifikan dari Variasi ATK0-CPT0 (52,1%) ke Variasi ATK2,5-CPT5 (70,3%). Kenaikan sebesar 18,2% ini menunjukkan bahwa penambahan substitusi material organik berupa *Cocopeat* (CPT) dan Abu Tempurung Kelapa (ATK) berdampak pada penurunan kekuatan ikat antar agregat di dalam campuran beton porous. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi ATK0-CPT0 memiliki ketahanan abrasi yang lebih baik dibandingkan variasi ATK2,5-CPT5 karena nilai kehilangan massanya lebih rendah. Sementara itu, variasi ATK2,5-CPT5 menunjukkan tingkat pelepasan agregat yang lebih besar sehingga memiliki durabilitas yang lebih rendah terhadap gesekan dan tumbukan. Tingginya nilai Cantabro Loss pada kedua variasi dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain ikatan pasta semen dengan agregat yang kurang kuat, kadar rongga (void) yang tinggi, faktor air semen yang rendah sehingga pasta tidak mampu melapisi agregat secara optimal, serta kuat

tekan beton yang relatif rendah (Rao dkk., 2016), bisa juga disebabkan oleh beberapa faktor lain seperti:

1. Sifat Organik *Cocopeat*: *Cocopeat* memiliki sifat elastis dan lunak dibandingkan pasir. Kehadirannya di dalam mortar menyebabkan ikatan antara pasta semen dan agregat kasar menjadi lebih lemah (*weak interfacial transition zone*). Akibatnya, saat sampel dijatuhkan dalam mesin Los Angeles, agregat lebih mudah terlepas dari ikatannya (Ali dkk., 2012).
2. Struktur Berpori: Sejalan dengan hasil uji permeabilitas yang menunjukkan Variasi ATK2,5-CPT5 lebih porus (626,4 mm/menit), struktur yang lebih berongga ini secara mekanis menurunkan luas permukaan kontak antar material. Semakin banyak rongga, semakin sedikit area yang saling mengunci (*interlocking*), sehingga meningkatkan potensi kehilangan massa saat menerima beban dampak dan abrasi (Wu dkk., 2016).
3. Karakteristik ATK: Meskipun Abu Tempurung Kelapa (ATK) membantu sebagai pengisi pori mikro, pada persentase tertentu, substitusi semen oleh material sisa pembakaran dapat mempengaruhi kecepatan hidrasi semen, yang secara tidak langsung berdampak pada kekerasan pasta semen dalam mengikat agregat (Aprianti dkk., 2015).

Nilai *Cantabro Loss* yang tinggi pada Variasi ATK2,5-CPT5 (70,3%) mengindikasikan bahwa *paving* ini memiliki durabilitas yang lebih rendah dibandingkan variasi kontrol. Secara teknis, material dengan nilai keausan tinggi lebih disarankan untuk area dengan beban lalu lintas rendah atau area pejalan kaki (pedestrian), di mana gaya gesek permukaan tidak seintens pada jalan raya (ACI Committee 522, 2010). Hal ini menjadi kompensasi atas keunggulannya dalam nilai permeabilitas yang tinggi untuk drainase air hujan.

Pada beton berpori, peningkatan porositas umumnya akan meningkatkan permeabilitas namun menurunkan kekuatan dan ketahanan abrasi. Oleh karena itu, campuran beton berpori perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kemampuan meloloskan air dan kekuatan mekanisnya. Meskipun nilai *Cantabro Loss* yang diperoleh cukup besar dibandingkan rentang umum pada beberapa

penelitian beton berpori, hasil tersebut masih dapat digunakan sebagai data evaluasi karakteristik material. Hal ini karena standar ASTM C1747 lebih berfokus pada metode pengujian dan tidak menetapkan batas kelulusan tertentu untuk beton berpori (ASTM, 2013). Oleh sebab itu, interpretasi hasil lebih banyak dibandingkan dengan penelitian terdahulu dan karakteristik campuran yang digunakan.

#### 4.3.6 Analisis Biaya

Analisis biaya dilakukan untuk mengetahui serta membandingkan nilai ekonomis antara produksi *paving porous* kontrol dengan *paving porous* inovasi yang menggunakan substitusi abu tempurung kelapa sebagai substitusi semen dan *cocopeat* sebagai substitusi pasir. 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.

Perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) pada penelitian ini menggunakan standar harga material dasar yang mengacu pada Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) tahun 2026. Sementara itu, untuk harga material substitusi berupa abu tempurung kelapa dan serbuk sabut kelapa (*cocopeat*), data diperoleh berdasarkan survei harga pasar rata-rata yang berlaku di wilayah Semarang. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi biaya produksi dari setiap variasi campuran, yang rincian kebutuhannya dipaparkan pada bagian berikut.

##### a. Variasi ATK0-CPT0

Variasi ATK0-CPT0 dikategorikan sebagai *paving porous* kontrol dengan penggunaan proporsi abu tempurung kelapa 0% dan *cocopeat* 0%. Analisa biaya yang diperlukan untuk pembuatan variasi ATK0-CPT0 disajikan pada Tabel 4.22.

**Tabel 4. 22** Analisa Biaya ATK0-CPT0

Variasi ATK0-CPT0					
No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir	169	gram	Rp256	Rp43,26
2.	Kerikil	1581	gram	Rp265	Rp418,95
3.	Semen	486	gram	Rp1.400	Rp680
Total Biaya / <i>Paving</i>					Rp1.142,21
Total Biaya / 1 m <sup>2</sup>					Rp57.110,50

Analisa biaya produksi untuk *paving porous* variasi ATK0-CPT0 adalah sebesar Rp1.142,21 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.22. Untuk aplikasi dalam skala luas, biaya pembuatan *paving porous* variasi ATK0-CPT0 per 1 m<sup>2</sup> adalah sebesar Rp57.110,50.

b. Variasi ATK2,5-CPT0

Variasi ATK2,5-CPT0 dikategorikan sebagai *paving porous* dengan penggunaan proporsi abu tempurung kelapa 2,5% dan *cocopeat* 0%. Analisa biaya yang diperlukan untuk pembuatan variasi ATK2,5-CPT0 disajikan pada Tabel 4.23.

**Tabel 4. 23** Analisa Biaya ATK2,5-CPT0

Variasi ATK2,5-CPT0					
No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir	169	gram	Rp256	Rp43,26
2.	Kerikil	1581	gram	Rp265	Rp418,95
3.	Semen	471	gram	Rp1.400	Rp659,4
4.	Tempurung Kelapa	8,9	gram	Rp1.300	Rp11,57
Total Biaya / <i>Paving</i>					Rp1.133,18
Total Biaya / 1 m <sup>2</sup>					Rp56.659

Analisa biaya produksi untuk *paving porous* variasi ATK2,5-CPT0 adalah sebesar Rp1.133,18 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.23. Untuk aplikasi dalam skala luas, biaya pembuatan *paving porous* variasi ATK2,5-CPT0 per 1 m<sup>2</sup> adalah sebesar Rp56.659.

c. Variasi ATK2,5-CPT5

Variasi ATK2,5-CPT5 dikategorikan sebagai *paving porous* dengan penggunaan proporsi abu tempurung kelapa 2,5% dan *cocopeat* 5%. Analisa biaya yang diperlukan untuk pembuatan variasi ATK2,5-CPT5 disajikan pada Tabel 4.24.

**Tabel 4. 24** Analisa Biaya ATK2,5-CPT5

Variasi ATK2,5-CPT5					
No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir	161	gram	Rp256	Rp41,216
2.	Kerikil	1581	gram	Rp265	Rp418,95
3.	Semen	471	gram	Rp1.400	Rp659,4
4.	Tempurung Kelapa	8,9	gram	Rp1.300	Rp11,57
5.	Serabut Kelapa	3,1	gram	Rp1.000	Rp3,1

Variasi ATK2,5-CPT5	
Total Biaya / Paving	Rp1.134,24
Total Biaya / 1 m <sup>2</sup>	Rp56.712

Analisa biaya produksi untuk *paving porous* variasi ATK2,5-CPT5 adalah sebesar Rp1.134,24 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.24. Untuk aplikasi dalam skala luas, biaya pembuatan *paving porous* variasi ATK2,5-CPT5 per 1 m<sup>2</sup> adalah sebesar Rp56.712.

d. Variasi ATK2,5CPT10

Variasi ATK2,5-CPT10 dikategorikan sebagai *paving porous* dengan penggunaan proporsi abu tempurung kelapa 2,5% dan *cocopeat* 10%. Analisa biaya yang diperlukan untuk pembuatan variasi ATK2,5-CPT10 disajikan pada Tabel 4.25.

**Tabel 4. 25** Analisa Biaya ATK2,5-CPT10

Variasi ATK2,5-CPT10					
No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir	152	gram	Rp256	Rp38,912
2.	Kerikil	1581	gram	Rp265	Rp418,95
3.	Semen	471	gram	Rp1.400	Rp659,4
4.	Tempurung Kelapa	8,9	gram	Rp1.300	Rp11,57
5.	Serabut Kelapa	6,3	gram	Rp1.000	Rp6,3
Total Biaya / Paving					Rp1.135,132
Total Biaya / 1 m <sup>2</sup>					Rp56.756,6

Analisa biaya produksi untuk *paving porous* variasi ATK2,5-CPT10 adalah sebesar Rp1.135,132 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.25. Untuk aplikasi dalam skala luas, biaya pembuatan *paving porous* variasi ATK2,5-CPT10 per 1 m<sup>2</sup> adalah sebesar Rp56.756,6.

e. Variasi ATK2,5-CPT15

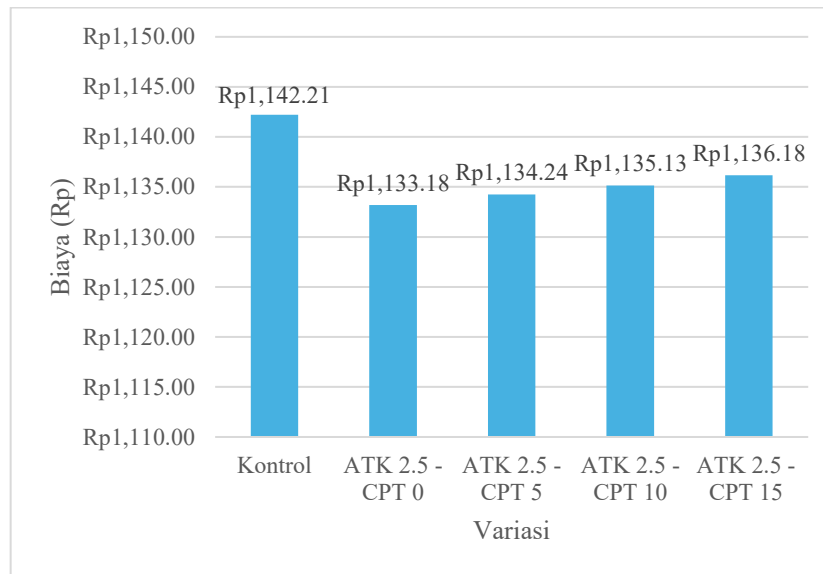
Variasi ATK2,5-CPT15 dikategorikan sebagai *paving porous* dengan penggunaan proporsi abu tempurung kelapa 2,5% dan *cocopeat* 15%. Analisa biaya yang untuk pembuatan variasi ATK2,5-CPT15 disajikan pada Tabel 4.26.

**Tabel 4. 26** Analisis Biaya ATK2,5-CPT15

Variasi ATK2,5-CPT15					
No.	Bahan	Kuantitas	Satuan	Harga/Kg	Jumlah
1.	Pasir	144	gram	Rp256	Rp36.864
2.	Kerikil	1581	gram	Rp265	Rp418,95
3.	Semen	471	gram	Rp1.400	Rp659,4
4.	Tempurung Kelapa	8,9	gram	Rp1.300	Rp11,57
5.	Serabut Kelapa	9,4	gram	Rp1.000	Rp9,4
Total Biaya / <i>Paving</i>					Rp1.136,18
Total Biaya / 1 m <sup>2</sup>					Rp56.809

Analisa biaya produksi untuk *paving porous* variasi ATK2,5-CPT15 adalah sebesar Rp1.136,18 per unit sesuai dengan rincian pada Tabel 4.26. Untuk aplikasi dalam skala luas, biaya pembuatan *paving porous* variasi ATK2,5-CPT15 per 1 m<sup>2</sup> adalah sebesar Rp56.809.

Setelah dilakukan analisis biaya pada masing-masing variasi campuran, hasil perhitungan biaya produksi per unit *paving porous* selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah perbandingan antar variasi. Penyajian grafik ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pengaruh penggunaan abu tempurung kelapa dan *cocopeat* terhadap biaya produksi *paving porous*. Perbandingan biaya produksi pada setiap variasi campuran dapat dilihat pada Grafik 4.6.



**Grafik 4. 6 Analisis Biaya**

Berdasarkan Grafik 4.6, biaya produksi paving porous pada setiap variasi campuran menunjukkan perbedaan yang relatif kecil. Variasi kontrol (ATK0-CPT0) memiliki biaya produksi tertinggi, yaitu sebesar Rp1.142,21 per unit. Setelah dilakukan substitusi abu tempurung kelapa sebesar 2,5%, biaya produksi mengalami penurunan pada variasi ATK2,5-CPT0 menjadi Rp1.133,18 per unit. Selanjutnya, biaya produksi meningkat secara bertahap pada variasi ATK2,5-CPT5 sebesar Rp1.134,24, ATK2,5-CPT10 sebesar Rp1.135,13, dan mencapai Rp1.136,18 per unit pada variasi ATK2,5-CPT15.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan abu tempurung kelapa dan penambahan *cocopeat* hingga 15% tidak menyebabkan perubahan biaya produksi yang signifikan. Meskipun terjadi kenaikan biaya seiring bertambahnya persentase *cocopeat*, selisih biaya antar variasi masih tergolong kecil. Selain itu, seluruh variasi dengan substitusi material limbah memiliki biaya produksi yang lebih rendah dibandingkan variasi kontrol. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan abu tempurung kelapa dan *cocopeat* sebagai bahan substitusi tidak hanya berpotensi meningkatkan nilai guna limbah, tetapi juga dapat menjadi alternatif yang ekonomis dalam produksi paving porous.

#### 4.4. Hasil Penelitian

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

**Tabel 4. 27** Rekapitulasi Hasil Penelitian

Jenis Pengujian	Sampel				
	ATK0-CPT0	ATK2,5-CPT0	ATK2,5-CPT5	ATK2,5-CPT10	ATK2,5-CPT15
<b>Kuat Tekan (Mpa)</b>	4,7	5,34	4	3,55	3,19
<b>Daya Serap Air (%)</b>	3,51%	2,91%	3,27%	3,42%	3,67%
<b>Porositas (%)</b>	8,41%	6,95%	7,72%	7,98%	8,44%
<b>Permeabilitas</b>	565,8	531,5	626,4	762,6	876,9
<b>Cantabro Loss</b>	52,10%	-	70,30%	-	-
<b>Biaya (Rp)</b>	Rp1.142,21	Rp1.133,18	Rp1.134,24	Rp1.135,13	Rp1.136,18

Berdasarkan tabel rekapitulasi hasil pengujian, dapat dilihat bahwa penambahan abu tempurung kelapa dan serbuk sabut kelapa (cocopeat) memberikan pengaruh terhadap karakteristik mekanis, fisik, hidrolis, serta biaya produksi paving porous. Nilai kuat tekan berada pada kisaran 3,19–5,34 MPa, dengan nilai tertinggi diperoleh pada variasi ATK2,5-CPT0 sebesar 5,34 MPa dan nilai terendah pada variasi ATK2,5-CPT15 sebesar 3,19 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan abu tempurung kelapa sebesar 2,5% mampu meningkatkan kuat tekan dibandingkan variasi kontrol ATK0-CPT0 yang memiliki kuat tekan sebesar 4,70 MPa. Namun, peningkatan kadar cocopeat dari 5% hingga 15% menyebabkan kuat tekan menurun akibat bertambahnya rongga dan porositas dalam campuran. Temuan ini sejalan dengan penelitian Berlian dkk (2021), yang menunjukkan bahwa abu tempurung kelapa pada kadar rendah mampu meningkatkan kuat tekan karena kandungan silika yang bersifat pozzolan membantu proses hidrasi semen.

Dari aspek daya serap air, nilai yang diperoleh berada pada rentang 2,91%–3,67%. Variasi ATK2,5-CPT0 menghasilkan daya serap air terendah sebesar 2,91%, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada variasi ATK2,5-CPT15 sebesar 3,67%. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan abu tempurung kelapa dapat menurunkan daya serap air akibat struktur campuran yang lebih padat, sedangkan peningkatan kadar cocopeat cenderung meningkatkan daya serap air karena sifatnya yang berpori dan mampu menyerap air.

Nilai porositas paving porous berada pada rentang 6,95%–8,44%. Porositas terendah diperoleh pada variasi ATK2,5-CPT0 sebesar 6,95%, sedangkan porositas tertinggi terdapat pada variasi ATK2,5-CPT15 sebesar 8,44%. Peningkatan porositas tersebut menunjukkan bahwa penggunaan cocopeat mampu membentuk rongga tambahan pada campuran sehingga mendukung fungsi paving porous sebagai material yang mampu meloloskan air ke dalam tanah.

Hal tersebut juga terlihat pada hasil pengujian permeabilitas yang menunjukkan nilai antara 531,5 mm/menit hingga 876,9 mm/menit. Variasi ATK2,5-CPT15 menghasilkan permeabilitas tertinggi sebesar 876,9 mm/menit, sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi ATK2,5-CPT0 sebesar 531,5 mm/menit. Semakin tinggi kadar cocopeat yang digunakan, semakin besar pula nilai permeabilitas yang dihasilkan karena meningkatnya jumlah rongga yang saling terhubung dalam struktur paving. Temuan ini sejalan dengan penelitian Syahwanti dkk (2025), yang menyatakan bahwa penambahan cocopeat mampu meningkatkan porositas dan permeabilitas beton permeabel.

Pada pengujian Cantabro Loss, variasi ATK0-CPT0 menunjukkan kehilangan massa sebesar 52,10%, sedangkan variasi ATK2,5-CPT5 mengalami kehilangan massa sebesar 70,30%. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan porositas dan rongga akibat penambahan cocopeat dapat menurunkan ketahanan paving terhadap pelepasan butiran. Meskipun demikian, karakteristik tersebut masih dapat diterima mengingat tujuan utama paving porous adalah meningkatkan kemampuan infiltrasi air.

Dari aspek biaya produksi, seluruh variasi memiliki biaya yang relatif berdekatan, yaitu berkisar antara Rp1.133,18 hingga Rp1.142,21 per buah. Variasi ATK2,5-CPT0 memiliki biaya produksi terendah sebesar Rp1.133,18, sedangkan variasi kontrol ATK0-CPT0 memiliki biaya tertinggi sebesar Rp1.142,21. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah abu tempurung kelapa dan cocopeat tidak hanya memberikan manfaat teknis dan lingkungan, tetapi juga mampu menekan biaya produksi paving porous.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi abu tempurung kelapa dan cocopeat mampu menghasilkan paving porous yang memiliki karakteristik mekanis, fisik, dan hidrolik yang berbeda pada setiap variasi. Meskipun variasi ATK2,5-CPT0 menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 5,34 MPa, variasi tersebut memiliki nilai porositas dan permeabilitas yang lebih rendah dibandingkan variasi yang mengandung cocopeat. Sebaliknya, peningkatan kadar cocopeat hingga 10% dan 15% memang mampu meningkatkan porositas dan permeabilitas, namun menyebabkan penurunan kuat tekan yang cukup signifikan.

Berdasarkan pertimbangan seluruh parameter pengujian, variasi ATK2,5-CPT5 dapat dianggap sebagai variasi yang paling optimal. Variasi ini menghasilkan kuat tekan sebesar 4,00 MPa yang masih berada dalam rentang kuat tekan beton berpori menurut ACI 522R-10, dengan daya serap air sebesar 3,27%, porositas 7,72%, dan permeabilitas 626,4 mm/menit. Nilai-nilai tersebut menunjukkan keseimbangan yang baik antara kemampuan menahan beban dan kemampuan meloloskan air. Selain itu, biaya produksi variasi ini relatif ekonomis yaitu sebesar Rp1.134,24 per buah.

Dengan demikian, penggunaan abu tempurung kelapa sebesar 2,5% sebagai substitusi sebagian semen dan cocopeat sebesar 5% sebagai substitusi sebagian agregat halus direkomendasikan sebagai komposisi optimum dalam pembuatan paving porous ramah lingkungan. Variasi ini mampu memberikan keseimbangan antara kuat tekan, porositas, permeabilitas, dan biaya produksi sehingga sesuai untuk aplikasi perkerasan berpori pada area pedestrian, taman, maupun kawasan resapan air.