

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi umum penelitian

Paving porous merupakan salah satu inovasi material konstruksi yang dirancang memiliki struktur pori terbuka, yang memungkinkan penyerapan air hujan langsung menuju lapisan tanah. Karakteristik ini menjadikan *paving porous* sangat relevan untuk mendukung konsep pembangunan berkelanjutan, khususnya dalam pengendalian limpasan permukaan dan peningkatan infiltrasi air tanah pada kawasan perkotaan. Aplikasi *paving porous* umumnya digunakan pada trotoar, area parkir, halaman, serta jalur pejalan kaki, karena selain berfungsi sebagai lapisan perkerasan, material ini juga berperan sebagai media resapan air. Namun, agar paving tetap mampu menahan beban lalu lintas ringan tanpa mengalami kerusakan struktural, penerapan harus mengimbangi kemampuan infiltrasi air dan kekuatan mekanis, terutama kekuatan tekan. Salah satu faktor utama yang memengaruhi karakteristik tersebut ialah gradasi agregat, yang berperan dalam pembentukan struktur rongga serta tingkat ikatan antarpartikel di dalam campuran.

Pengujian yang dilakukan meliputi uji kuat tekan, daya serap air, dan permeabilitas pada setiap variasi campuran. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan komposisi campuran optimum yang mampu menghasilkan *paving porous* dengan keseimbangan antara karakteristik mekanik dan hidrolis. Selain itu, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan dan perencanaan campuran *paving porous* yang efektif, aplikatif, serta berkelanjutan guna mendukung pembangunan infrastruktur yang ramah lingkungan.

4.2 Pengujian Material Penyusun Paving Porus

Sebelum proses pembuatan benda uji dilakukan, terlebih dahulu dilaksanakan pengujian terhadap material penyusun *paving porous* untuk memastikan karakteristik dan mutu bahan memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Pengujian material meliputi pemeriksaan sifat fisik agregat dan semen. Tahapan ini bertujuan untuk memperoleh data karakteristik material yang akan memengaruhi kualitas campuran *paving porous*,

sehingga hasil penelitian yang diperoleh dapat lebih akurat dan sesuai dengan standar pengujian yang berlaku

4.2.1 Pengujian Agregat Kasar (ASTM C136)

Analisis saringan dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel agregat dalam komposisi *paving porous*. Tujuan utama prosedur ini adalah menetapkan gradasi atau komposisi granular agregat agar sesuai dengan kriteria desain campuran yang ditetapkan. Metodologi pengujian melibatkan penyaringan sampel agregat kering melalui serangkaian saringan bertahap dimulai dari mesh terbesar hingga yang paling halus diikuti dengan pengukuran massa material yang tertahan pada setiap tingkatan. Hasil pengujian selanjutnya disajikan dalam bentuk persentase tertahan dan persentase lolos kumulatif untuk dianalisis lebih lanjut.

Pengujian dilaksanakan melalui proses penyaringan sampel agregat dalam keadaan kering menggunakan serangkaian saringan standar yang tersusun secara bertahap dari ukuran bukaan terbesar ke terkecil. Pasca-proses penyaringan selesai, massa agregat yang tertahan pada setiap saringan ditimbang untuk menentukan distribusi bobot pada tiap fraksi ukuran.

Tabel 4. 1 Gradasi angregat

Sieve Size		Berat Tertahan	Kumulatif Berat Tertahan	Presentase tertahan	Presentase Lolos
<i>inch</i>	<i>Mm</i>	<i>Gram</i>	<i>Gram</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
1	25	0	0	0,00	100,00
3/4"	19	0	0	0,00	100,00
1/2"	12,5	12	12	0,36	99,64
3/8"	9,5	217	229	6,94	93,06
4	4,75	2244	2473	74,98	25,02
8	2,36	759	3232	98,00	2,00
16	1,18	21	3253	98,64	1,36
30	0,6	7	3260	98,85	1,15
50	0,3	3	3263	98,94	1,06
100	0,15	0	3263	98,94	1,06
200	0,075	0	3263	98,94	1,06
pan		35	3298	100,00	0,00
TOTAL		3298		0,00	100,00

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Presentase komulatif lolos

Contoh perhitungan presentase komulatif lolos pada saringan No.4

$$\begin{aligned} (\%) \text{ Komulatif lolos} &= 100\% - \% \text{ Komulatif tertahan} \\ &= 100\% - 74,58\% \\ &= 25,42\% \end{aligned}$$

Presentase tertahan

Contoh perhitungan presentase kerikil pada saringan no. 4

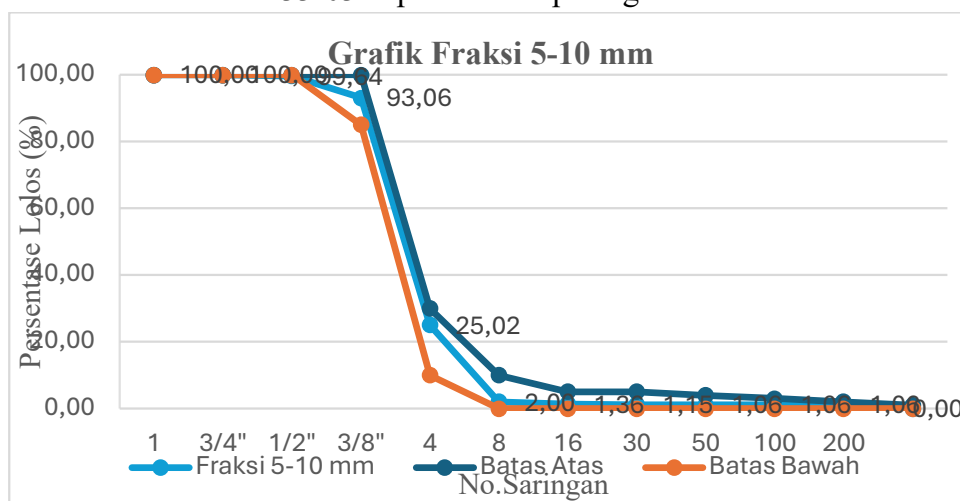
$$\begin{aligned} (\%) \text{ Kerikil} &= \left(\frac{\text{Komulatif berat tertinggal pada saringan}}{\text{berat pasir awal mula}} \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{2244}{3298} \right) \times 100\% \\ &= 74,52\% \end{aligned}$$

Modulus kehalusan

$$\begin{aligned} \text{Modulus kehalusan} &= \left(\frac{\Sigma \text{Komulatif tertahan}}{100} \right) \\ &= \left(\frac{674.6}{100} \right) \\ &= 6,746 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh nilai modulus kehalusan sebesar 6,736. Sesuai ketentuan ASTM C33-03 untuk agregat kasar, rentang modulus kehalusan yang diperbolehkan adalah 6,0 hingga 7,1. Dengan demikian, modulus kehalusan agregat kasar berukuran 0-10 mm yang mencapai 6,745 telah memenuhi persyaratan dan layak digunakan sebagai komponen utama dalam campuran beton.

Kriteria zona gradasi agregat kasar sebagaimana diatur dalam standar ASTM C33-03 dapat diamati pada grafik 4.1.



Grafik 4. 1 Gradasi agregat
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Grafik 4.1, hasil analisis gradasi agregat kasar fraksi 5–10 mm menunjukkan bahwa kurva gradasi agregat yang diuji berada di antara batas bawah dan batas atas yang dipersyaratkan oleh ASTM C33-03. Kondisi ini mengindikasikan bahwa distribusi ukuran butiran agregat telah memenuhi kriteria gradasi yang ditetapkan untuk agregat kasar

1. Berat jenis agregat

Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik kepadatan relatif agregat yang diaplikasikan dalam campuran *paving porous*, mengingat parameter berat jenis memiliki peran penting dalam menentukan komposisi campuran serta memengaruhi kinerja mekanik dan permeabilitas material yang dihasilkan. Pengujian dilakukan melalui pengukuran massa agregat dalam tiga kondisi utama yaitu kering oven, jenuh dengan permukaan kering (SSD), serta terendam air dengan metodologi yang disesuaikan berdasarkan jenis agregat, baik yang halus maupun kasar.

Data hasil pengujian selanjutnya diproses untuk menghasilkan nilai berat jenis curah, berat jenis semu, serta persentase absorpsi air agregat. Parameter-parameter tersebut berfungsi sebagai dasar fundamental dalam tahap desain komposisi *paving porous*.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Berat Jenis Agregat

Nama Data	Kode	Satuan	Percobaan	
			1	2
Berat Keranjang		Gram	1037	1037
Berat Kerikil SSD	B	Gram	3000	3000
Berat Keranjang + Kerikil		Gram	4037	4037
Berat Keranjang + Kerikil SSD + air	C	Gram	2598	2606
Berat Keranjang + Kerikil Oven		Gram		
Berat Keranjang Dalam Air	A	Gram	800	800
Berat Jenis Kerikil			<i>2.50</i>	<i>2.51</i>
=Rata Rata			<i>2.50</i>	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Pengujian berat jenis agregat kasar didasarkan pada standar Badan Standardisasi Nasional (BSN) SNI 1969:2008. Berat jenis SSD menunjukkan kondisi agregat saat pori-porinya jenuh air namun permukaannya kering, sehingga nilai ini digunakan dalam perhitungan campuran beton. Secara umum, agregat kasar normal memiliki berat jenis SSD antara 2,50–2,80. Jika hasil pengujian berada dalam rentang tersebut dan memenuhi persyaratan teknis lainnya, maka agregat dinyatakan layak untuk beton normal.

Pengujian berat jenis agregat kasar bertujuan mengungkap tingkat kepadatan serta sifat fisik agregat yang dimanfaatkan dalam komposisi *paving porous*. Hasil analisis menunjukkan bahwa agregat kasar tersebut memiliki nilai berat jenis sebesar 2,50.

2. Pengujian resapan agregat

Pengujian absorpsi agregat kasar dimaksudkan untuk mengevaluasi kapasitas agregat dalam menyerap air ke dalam rongga porinya. Secara spesifik, prosedur ini mengukur volume air yang dapat diabsorpsi oleh agregat setelah perendaman hingga mencapai kondisi jenuh permukaan kering (SSD). Parameter absorpsi ini bersifat krusial karena berdampak pada estimasi kebutuhan air dalam campuran beton, mencegah defisiensi atau ekse air yang berpotensi mengganggu workability serta ketahanan *paving porous*. Metodologi pengujian mencakup perendaman agregat kering dalam air selama durasi yang ditentukan, diikuti pengukuran massa pada kondisi SSD dan kering oven. Hasil diungkapkan dalam bentuk persentase (%) dan dijadikan acuan utama dalam desain campuran beton guna memastikan proporsi air yang presisi serta performa *paving porous* yang optimal.

Tabel 4. 3 Pengujian Resapan agregat

Nama Data	Kode	Satuan	Percobaan	
			1	2
Berat Tempas		gram	110	145
Berat Tempas + Agregat Kasar SSD		gram	3110	3145
Berat Agregat Kasar SSD	W1	gram	3000	3000
Berat Tempas + Agregat Kasar Oven		gram	3064	3109
Berat Agregat Kasar Setelah Oven	W2	gram	2954	2964
Kadar Air Resapan		%	1,5572	1,2146
Rata Rata		%	1,39	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Pengujian absorpsi atau penyerapan air agregat kasar dilaksanakan mengikuti SNI 1969:2008, yang mengatur protokol perendaman, pengeringan hingga kondisi jenuh permukaan kering (SSD), serta pengukuran massa guna menentukan kapasitas penyerapan air agregat. Prosedur ini bertujuan mengidentifikasi derajat porositas internal agregat, mengingat nilai absorpsi yang lebih tinggi mencerminkan volume pori yang lebih besar pada material tersebut. Hal itu akan mempengaruhi jumlah air efektif dalam campuran beton dan pada akhirnya mempengaruhi kuat tekan dan workability beton.

Hasil pengujian mengindikasikan bahwa agregat kasar memiliki tingkat absorpsi sebesar 1,39%. Nilai tersebut mencerminkan kemampuan penyerapan air yang sangat rendah, yang mengimplikasikan porositas minimal serta struktur padat dan tangguh pada agregat. Menurut ketentuan mutu agregat yang merujuk pada SNI 1969:2008, agregat kasar pada umumnya dinyatakan memenuhi syarat apabila nilai penyerapan airnya tidak melebihi 3%.

Dibandingkan dengan ambang batas standar, nilai absorpsi agregat dari pengujian ini masih jauh di bawah 3% tepatnya 1,39% yang mengindikasikan kualitas agregat kasar yang superior dan sangat sesuai untuk penerapan dalam komposisi *paving porous*.

3. Pengujian kadar lumpur

Dalam proses pembuatan paving poros, pengujian kadar lumpur pada agregat merupakan langkah penting untuk menilai tingkat kebersihan material penyusun, terutama dalam hal mempertahankan karakteristik porositas dan kinerja hidrolis. Prosedur pengujian ini difokuskan pada identifikasi persentase partikel halus seperti debu, lempung, dan zat organik yang menempel pada permukaan agregat.

Tabel 4. 4 Pengujian kadar lumpur

Nama Data	Kode	Satuan	Percobaan	
			1	2
Berat Wadah		gram	145	115
Berat Agregat Kasar Kering	B	gram	2500	2500
Berat Wadah + Agregat Kasar Kering		gram	2645	2615
Berat Agregat Kering Setelah Di oven	C	gram	2492	2483
Kadar Lumpur		%	0,32	0,68
Rata-Rata		%	0,5	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Persentase material halus yang melalui saringan No. 200 (ukuran 75 μm) ditentukan melalui pengujian kadar lumpur pada agregat kasar. Standar ASTM C117, yang melibatkan uji pencucian untuk memisahkan partikel halus dari butiran agregat, diterapkan dalam prosedur ini. Pengendalian kandungan material halus ini bersifat esensial, sebab dapat mengganggu adhesi antara matriks semen dan agregat, menurunkan workability, serta merusak kekuatan akhir beton.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat memiliki kadar lumpur sebesar 0,5%. Jika dibandingkan dengan batas maksimum yang diperbolehkan oleh standar ASTM C33, yaitu $\leq 1,0\%$ untuk agregat kasar, maka seluruh sampel agregat dalam pengujian ini dinyatakan memenuhi kriteria. Rendahnya kadar lumpur tersebut mengindikasikan kualitas agregat yang unggul, bebas kontaminan, dan sangat sesuai untuk produksi *paving porous*.

4. Pengujian Keausan agregat

pengujian ini bertujuan untuk menilai daya tahan mekanis agregat terhadap disintegrasi yang disebabkan oleh interaksi antarpartikel maupun beban eksternal. Agregat yang memiliki ketahanan abrasi rendah cenderung mudah hancur, yang pada akhirnya dapat menghasilkan partikel halus tambahan. Dalam sistem *paving porous*, kondisi tersebut berpotensi menurunkan kinerja infiltrasi karena pori-pori dapat tersumbat, serta mengurangi kekuatan struktural akibat berkurangnya interlocking antar agregat. Pengujian dilakukan menggunakan alat Los Angeles (Los Angeles Abrasion Machine), di mana sampel agregat dicampur dengan bola baja dan diputar dengan jumlah putaran tertentu. Setelah pengujian selesai, agregat yang mengalami keausan disaring dan ditimbang untuk menghitung persentase kehilangan berat.

Tabel 4. 5 Pengujian Keausan agregat

Nama Data	Satuan	Kode	Percobaan
Berat Wadah	gram		
Berat Kerikil Sebelum Abrasi	gram	A	5000
Berat Kerikil Tertahan Ayakan no 12	gram	B	3213,3
Keausan	%		35,734

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Pengujian keausan agregat dilaksanakan dengan Mesin Los Angeles berdasarkan SNI 2417:2008, guna mengevaluasi ketangguhan agregat terhadap keausan akibat gesekan dan benturan. Nilai abrasi, yang merepresentasikan persentase penurunan berat agregat pasca-rotasi sebanyak siklus tertentu, mencerminkan kualitas agregat dengan angka yang semakin rendah menandakan performa yang semakin baik.

Hasil pengujian mengindikasikan nilai abrasi agregat sebesar 35,73%. Mengacu pada SNI 2417:2008, agregat untuk beton struktural wajib memiliki abrasi maksimal 40%. Dengan demikian, semua fraksi agregat yang diuji telah memenuhi kriteria kelayakan, sebab nilainya berada di bawah ambang 40%. Rata-rata 35,73% tersebut juga mencerminkan ketahanan terhadap keausan yang memadai.

5. Pengujian Berat Volume agregat

Pengujian berat volume agregat yang diperoleh dari dua kondisi pengujian, yaitu tanpa rojokan dan dengan rojokan. Pembahasan ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemadatan terhadap nilai berat volume agregat serta untuk melihat kecenderungan perubahan kepadatan butiran agregat pada masing-masing kondisi. Hasil pengujian tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam menilai karakteristik agregat yang diuji dan hubungannya terhadap penggunaan agregat dalam campuran *paving porous*.

Tabel 4. 6 Berat Volume agregat

Data Percobaan	Satuan	Tanpa Rojokan	Dengan Rojokan
Berat Silinder	Gram	5673	5673
D	Cm	16	16
H	Cm	23	23
D/H	cm ³	0.6957	0.6957
Volume Silinder	cm ³	4626.29	4626.29
Berat Silinder + Kerikil	Gram	7660	8080
Berat Pasir	Gram	7280	7470
Berat Volume	gr/cm ³	1.574	1.615
Rata-rata	gr/cm ³	1.594151433	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berat volume agregat normal berkisar antara 1,200 hingga 1,800 kg/m³, yang mencakup agregat kasar dan halus yang digunakan dalam campuran beton. Parameter ini penting untuk menentukan proporsi material dalam beton agar mencapai kualitas yang optimal.

Berdasarkan table 4.6, berat volume agregat pada kondisi tanpa rojokan diperoleh sebesar 1,574 gr/cm³, sedangkan pada kondisi dengan rojokan diperoleh sebesar 1,615 gr/cm³. Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai berat volume agregat dengan rojokan lebih besar dibandingkan tanpa rojokan, karena proses pemadatan menyebabkan susunan butiran menjadi lebih rapat sehingga rongga antarpartikel berkurang. Selain itu, perbedaan berat silinder + kerikil maupun berat pasir antara kedua kondisi juga memperlihatkan adanya peningkatan massa isi dalam volume silinder yang sama, sehingga data ini menegaskan bahwa pemadatan berpengaruh terhadap kenaikan berat volume agregat.

4.2.2 Pengujian Semen dan Abu Ampas Tebu

Pengujian waktu ikat semen Portland dilakukan mengikuti prosedur SNI 03-6827-2002, dengan menggunakan alat Vicat untuk mengukur penurunan jarum pada pasta semen normal konsistensi pada interval waktu 15 menit. Hasil pengujian menunjukkan waktu ikat awal Semen tanpa campuran abu ampas tebu sebesar 120 menit (penurunan 28 mm, mendekati batas 25 mm sesuai definisi standar) dan waktu ikat akhir sebesar 165 menit (penurunan 0 mm)

Secara spesifik, laju penurunan menurun secara progresif dari 40 mm pada 45-90 menit menjadi 28 mm pada 120 menit, mencapai 10 mm pada 150 menit, dan stabil pada 0 mm pada 165 menit, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.6

Tabel 4. 7 Pengujian waktu ikat awal dan akhir semen

No	Satuan	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Waktu Penurunan	menit	45	60	75	90	105	120	135	150	165
Penurunan	Mm	40	40	40	37	30	28	10	4	0

(Sumber : Data Olahan Peneliti,2026)

Berdasarkan SNI 03-6827-2002, waktu ikat awal ditentukan ketika penurunan jarum mencapai 25 mm atau kurang dari kondisi awal, sedangkan waktu ikat akhir adalah saat jarum tidak meninggalkan jejak pada permukaan pasta (0 mm). Hasil pengujian ini memenuhi persyaratan performa semen Portland untuk aplikasi *paving porous*, dengan laju pengerasan yang stabil dan tidak terlalu cepat.

Hasil pengujian semen dengan substitusi 12% abu ampas tebu menunjukkan waktu ikat awal sebesar 135 menit (penurunan 26 mm, mendekati batas 25 mm sesuai definisi standar) dan waktu ikat akhir sebesar 195 menit (penurunan 0 mm)

Tabel 4. 8 Pengujian waktu ikat awal dan akhir semen + abu ampas tebu

No	Satuan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Waktu Penurunan	menit	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195
Penurunan	mm	40	40	40	39	35	32	26	14	8	3	0

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Fenomena meningkatnya waktu ikat awal pada campuran yang mengandung abu ampas tebu dapat dikaitkan dengan karakteristik abu ampas tebu yang kaya akan silika dan memiliki aktivitas pozzolanik yang berlangsung lebih lambat dibandingkan reaksi hidrasi semen Portland.

4.3 Perencanaan Rencana campuran (*Mix Design*) *Paving porous*

Perencanaan campuran *paving porous* pada penelitian ini mengacu pada pedoman ACI 522R-10 (Chapter 6), yang menetapkan tahapan perancangan untuk memperoleh beton dengan porositas tinggi namun tetap memiliki kekuatan yang memadai. Perhitungan ini berdasarkan prinsip volume absolut dan mempertimbangkan karakteristik agregat yang digunakan. Berikut menunjukkan proses perencanaan campuran (*mix design*) *paving porous* yang digunakan dalam penelitian ini.

1. Menentukan parameter desain

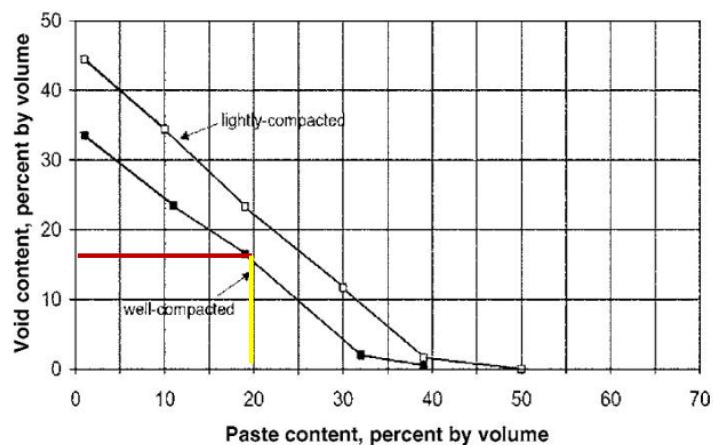
Sebelum memulai perhitungan, tentukan parameter berikut :

Tabel 4. 9 Rencana *Mix Design*

No.	Keterangan	Nilai	Satuan
1.	Kuat tekan target (f_c')	15	Mpa
2.	Porositas target (V_v)	18	%
3.	Faktor Voulume pasta (V_c)	20	%
4.	Ukuran Agregat	No. 08	-
5.	w/c	0,33	-

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Penentuan volume pasta dilakukan dengan menggunakan Grafik 4.2, yang menunjukkan hubungan antara persentase rongga (voids) yang diinginkan dalam beton dengan persentase volume pasta (paste volume) yang diperlukan untuk berbagai kondisi kepadatan, seperti well-compacted, average-compacted, dan loosely-compacted. Grafik tersebut digunakan untuk menentukan besarnya volume pasta yang dibutuhkan agar agregat dapat terlapsi dengan baik tanpa menutup pori yang direncanakan. dalam penelitian ini, digunakan void content sebesar 20%, sehingga berdasarkan interpolasi dari grafik yang sama, diperoleh volume pasta (V_p) 15% dari total volume beton,

**Grafik 4. 2** Void pasta

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

2. Menentukan volume Agregat kasar (V_a)

Penelitian ini menggunakan ukuran agregat 5mm-10mm, Berdasarkan **Tabel 4.9 ACI 522R-10**, untuk jenis agregat bergradasi No. 8 tanpa campuran agregat halus, diperoleh nilai rasio b/b_o sebesar 0,99.

Tabel 4. 10 Nilai b/b_o efektif

Presentase Agregat Halus (%)	b/b_o	
	ASTM C33/C33M Ukuran No. 8	ASTM C33/C33M Ukuran No. 67
	(0 mm – 10 mm)	(5 mm – 20 mm)
-	0,99	0,99
10	0,93	0,93
20	0,85	0,86

(Sumber : ACI 522R-10)

Berat Agregat (Kg) = Volume Agregat x b/b_o

$$\text{Berat Agregat (Kg)} = 1.5941 \times 0,99 = 1578,15 \text{ kg/m}^3$$

3. Koreksi Ke Berat SSD (*Saturated Surface Dry*)

Pada langkah ini dilakukan penyesuaian berat agregat ke kondisi Saturated Surface Dry (SSD) dengan mempertimbangkan daya serap air agregat. Agregat dalam kondisi kering oven akan menyerap air saat pencampuran, sehingga perlu dikoreksi untuk mendapatkan berat pada kondisi SSD. agregat SSD diperoleh dengan mengalikan berat kering 1578,15 kg/m³ dengan nilai resapan, sehingga didapatkan berat SSD sebesar 2044,88 kg/m³.

Berat SSD = Berat Kering x (Absorsi Rata Rata Agregat Kassar)

$$\text{Berat SSD} = 1578,15 \times 1,39\%$$

$$\text{Berat SSD} = 2193,62 \text{ kg/m}^3$$

4. Menentukan Semen Konten

Penelitian ini menggunakan semen OPC, dengan nilai densitas 3150 Kg/ m³, maka berat semen dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Berat Semen} = \left(\frac{V_p}{(\text{berat jenis semen} \times w/\text{cm})} \right) \times \text{BeratJenisAir}$$

$$\text{Berat Semen} = \left(\frac{20}{(3,15 \times 0,33)} \right) \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 233 \text{ kg/m}^3$$

5. Menentukan Air Konten

Penelitian ini menggunakan $w/c = 0.33$, maka volume airnya dapat ditentukan dengan rumus :

$$M_w = 0,33 \times 233 = 76,9 \text{ kg}$$

6. Menentukan Volume Padat

Tahap ini bertujuan untuk menentukan volume total material padat dalam campuran beton, yang terdiri atas volume agregat padat dan volume pasta semen. Volume padat ini merupakan bagian dari total volume beton setelah memperhitungkan ruang udara (void) yang direncanakan.

Secara prinsip, volume padat beton merupakan hasil penjumlahan dari tiga komponen utama, yaitu:

$$\text{Volume Padat} = V.\text{Agregat} + V.\text{Semen} + V.\text{Air}$$

a) Volume Agregat (V_a)

$$V_a = \frac{\text{Berat SSD}}{(\text{Berat Jenis Agregat} \times \text{Berat jenis Air})}$$

$$V_a = \frac{2193,62 \text{ kg/m}^3}{(2,50 \times 1000 \text{ kg/m}^3)} = 0,85 \text{ m}^3$$

b) Volume Semen (V_s)

$$V_s = \frac{\text{Berat Semen}}{(\text{Berat jenis Semen} \times \text{Berat jenis Air})}$$

$$V_s = \frac{233 \text{ kg/m}^3}{(3,15 \times 1000 \text{ kg/m}^3)} = 0,074 \text{ m}^3$$

c) Volume Air (V_w)

$$V_w = \frac{\text{Berat Air}}{\text{Berat Jenis Air}}$$

$$V_w = \frac{76,9 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,076 \text{ m}^3$$

d) Volume padat

$$\text{Volume Padat} = V.\text{Agregat} + V.\text{Semen} + V.\text{Air}$$

$$\text{Volume Padat} = 0,85 \text{ m}^3 + 0,074 \text{ m}^3 + 0,076 \text{ m}^3 = 1 \text{ m}^3$$

7. Menghitung kebutuhan material per m^3

- Dari perhitungan kebutuhan air, didapatkan perkiraan nilai kebutuhan air sebesar 76,9 kg/m³
- Menentukan berat agregat SSD

$$\text{Berat SSD} = \text{Berat Kering} \times (\text{Absorsi Rata Rata Agregat Kasar})$$

$$\text{Berat SSD} = 1578,15 \times 1,39\%$$

$$\text{Berat SSD} = 2193,92 \text{ kg/m}^3$$
- Perhitungan menentukan jumlah semen dapat menggunakan persamaan nilai rasio w/p yang telah ditentukan. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut :

Rumus menentukan jumlah semen Portland

$$\text{Kebutuhan semen portland} = \frac{(100-p) \times w}{(100-0,7P) \left(\frac{w}{(C+0,3F)} \right)}$$

Dimana :

P : Presentase Abu ampas tebu yang digunakan

$\frac{w}{(C+0,3F)}$: Nilai w/cm yang sudah ditentukan

W : Kadar Air Bebas

- Jumlah kebutuhan semen presentase Abu ampas tebu 0%

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Semen Portland} &= \frac{(100-p) \times w}{(100-0,7P) \left(\frac{w}{(C+0,3F)} \right)} \\ &= \frac{(100-0) \times 76,9}{(100-0,7 \times 0)(0,33)} \\ &= \frac{100 \times 76,9}{100 \times 0,34} = 233 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

- Jumlah kebutuhan semen presentase Abu ampas tebu 4%

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Semen Portland} &= \frac{(100-p) \times w}{(100-0,7P) \left(\frac{w}{(C+0,3F)} \right)} \\ &= \frac{(100-4) \times 76,9}{(100-0,7 \times 4)(0,33)} \\ &= 230 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

- Jumlah kebutuhan semen presentase Abu ampas tebu 8%

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Semen Portland} &= \frac{(100-p) \times w}{(100-0,7P) \left(\frac{w}{(C+0,3F)} \right)} \\ &= \frac{(100-8) \times 76,9}{(100-0,7 \times 8)(0,33)} \\ &= 227 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

- Jumlah kebutuhan semen presentase Abu ampas tebu 12%

$$\text{Kebutuhan Semen Portland} = \frac{(100-p) \times w}{(100-0,7P) \left(\frac{w}{(C+0,3F)} \right)}$$

$$= \frac{(100-12) \times 76,9}{(100-0,7 \times 12)(0,33)}$$

$$= 223,8 \text{ kg/m}^3$$

▪ Jumlah kebutuhan Abu ampas tebu

Abu ampas tebu merupakan bahan yang digunakan sebagai substitusi parsial semen pada campuran paving porous. Oleh karena itu, perhitungan kebutuhan abu ampas tebu didasarkan pada jumlah kebutuhan semen yang telah diperoleh pada tahap perhitungan campuran sebelumnya. Besarnya persentase substitusi yang digunakan akan menentukan jumlah abu ampas tebu yang menggantikan sebagian berat semen pada setiap variasi campuran. Perhitungan ini dilakukan untuk memastikan komposisi campuran sesuai dengan rancangan penelitian sehingga setiap benda uji memiliki proporsi material yang konsisten dan dapat menghasilkan data yang akurat. Adapun perhitungan jumlah kebutuhan abu ampas tebu yang digunakan adalah sebagai berikut: Rumus menentukan jumlah kebutuhan Abu ampas tebu

$$\text{Kebutuhan Abu ampas tebu} = \frac{p \times c}{100 - p}$$

Dimana :

P : Presentase Abu ampas tebu

C : Semen yang digunakan

– Kebutuhan Abu ampas tebu 0%

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Abu ampas tebu} &= \frac{p \times c}{100 - p} \\ &= \frac{0 \times 233}{100 - 0} \\ &= 0 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

– Kebutuhan Abu ampas tebu 4%

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Abu ampas tebu} &= \frac{p \times c}{100 - p} \\ &= \frac{4 \times 230}{100 - 4} \\ &= 9,58 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

– Kebutuhan Abu ampas tebu 8%

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan Abu ampas tebu} &= \frac{p \times c}{100 - p} \\ &= \frac{8 \times 227}{100 - 8} \\ &= 19,73 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

– Kebutuhan Abu ampas tebu 12%

$$\text{Kebutuhan Abu ampas tebu} = \frac{p \times c}{100 - p}$$

$$= \frac{12 \times 223,8}{100 - 12}$$

$$= 30,51 \text{ kg/m}$$

Tabel 4. 11 Kebutuhan Material per 1m³

Menentukan jumlah material 1m ³	0%	4%	8%	12%	TOTAL
semen	233	230	227	223,8	913,8
Abu	0	9,58	19,73	30,51	59,82
Agregat	2193,92	2193,92	2193,92	2193,92	8775,68
Air	76,9	76,9	76,9	76,9	307,6

(Sumber : Data Olahan Peneliti,2026)

8. Menghitung Kebutuhan Material Per Benda Uji

Pada penelitian ini digunakan benda uji berbentuk balok dengan ukuran, yaitu 21 x 10,5 x 8 cm, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$V = 21 \times 10,5 \times 8 = 1764 \text{ cm}^3 = 0,001764 \text{ m}^3$$

- Agregat kasar
 $2193,92 \times 0,001764 = 3,87 \text{ kg}$
- Air
 $76,9 \times 0,001764 = 0,135 \text{ liter}$
- Semen di variasi 0 %
 $233 \times 0,001764 = 411 \text{ gram}$
- Semen di variasi 4 %
 $222,1 \times 0,001764 = 405 \text{ gram}$
- Semen di variasi 8 %
 $211,83 \times 0,001764 = 400 \text{ gram}$
- Semen di variasi 12 %
 $200,37 \times 0,001764 = 394 \text{ gram}$
- Abu ampas tebu di variasi 4 %
 $9,58 \times 0,001764 = 17 \text{ gram}$
- Abu ampas tebu di variasi 8 %
 $19,73 \times 0,001764 = 35 \text{ gram}$
- Abu ampas tebu di variasi 12 %
 $30,51 \times 0,001764 = 54 \text{ gram}$

Tabel 4. 12 Kebutuhan Material Percetakan

1 cetakan	0%	4%	8%	12%	TOTAL
Kebutuhan semen	0,411	0,405	0,400	0,394	1,610
Kebutuhan abu	0,000	0,017	0,035	0,054	0,103
Kebutuhan agregat kasar	3,87	3,87	3,87	3,87	15,48
kebutuhan air	0,135	0,135	0,135	0,135	0,54

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

4.4 Pengujian *paving porous*

4.4.1 Kuat tekan

Pengujian kuat tekan pada *paving porous* dimaksudkan untuk mengukur kapasitas material dalam menahan beban kompresi hingga mencapai kegagalan atau deformasi substansial. Kekuatan tekan didefinisikan sebagai tegangan maksimum per satuan luas penampang yang dapat ditoleransi oleh spesimen sebelum mengalami kolaps struktural. Pada *paving porous*, nilai ini menjadi parameter kunci untuk mengevaluasi kelayakan material dalam aplikasi perkerasan, khususnya pada kondisi yang menuntut keseimbangan antara kekuatan dan kemampuan infiltrasi air. Faktor tersebut disebabkan oleh sifat khas *paving porous* yang menampilkan tingkat porositas relatif tinggi, sehingga cenderung mengurangi daya dukung dibandingkan dengan paving konvensional. Gambar berikut menyajikan contoh perhitungan kekuatan tekan pada sampel V0.1 :

Diketahui :

$$P = 21 \text{ cm}$$

$$L = 10,5 \text{ cm}$$

$$P = 13 \text{ Ton} = P \times \text{Gravitasi (N/Ton)} = 10 \times 9800 = 98066.5$$

$$A = P \cdot L = 21 \cdot 10,5 = 22050 \text{ mm}^2$$

$$f'c = \frac{P}{A}$$

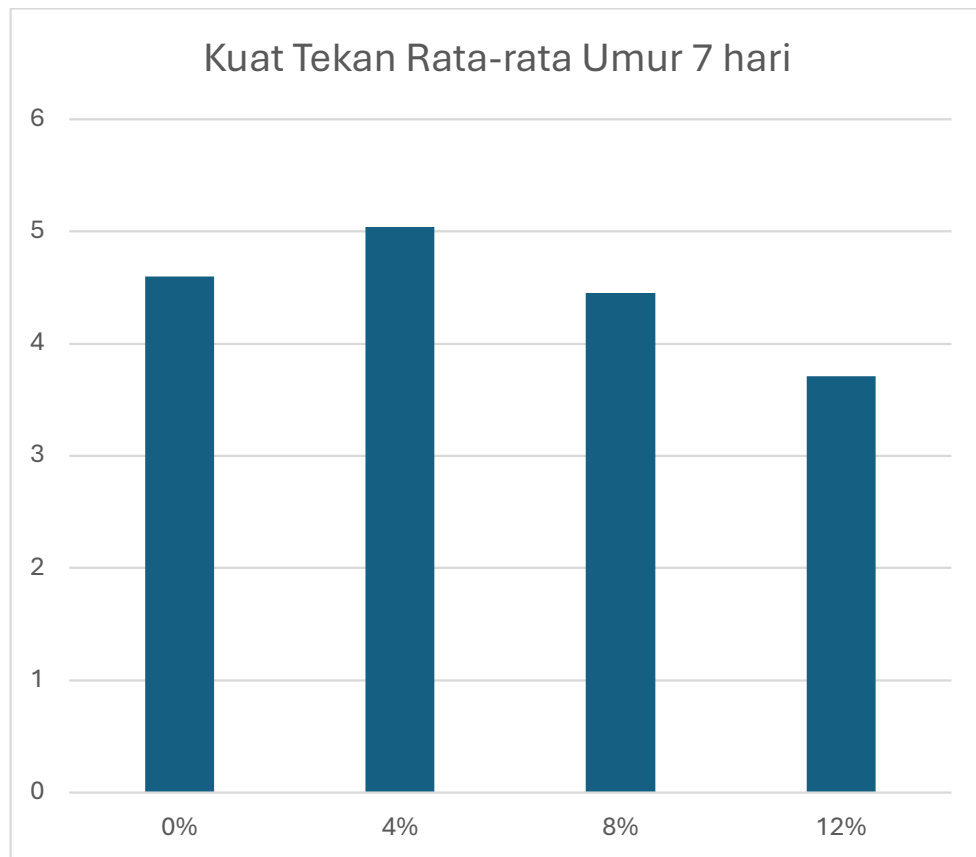
$$f'c = \frac{98066.5}{17678,57} = 4,45 \text{ Mpa}$$

Tabel 4. 13 Hasil Kuat Tekan Umur 7 Hari

No.	Presentase	Umur	Beban Maksimal (Ton)	Kuat Tekan (Mpa)	Kuat tekan Rata-Rata
1	0%	7	10	4.45	4.6
2	0%	7	11	4.89	
3	0%	7	10	4.45	
4	4%	7	12	5.54	5.04
5	4%	7	12	6.65	
6	4%	7	10	5.54	
7	8%	7	11	4.89	4.45
8	8%	7	9	4	
9	8%	7	10	4.45	
10	12%	7	8	3.56	3.71
11	12%	7	8	3.56	
12	12%	7	9	4	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan data Tabel 4.13, pada umur 7 hari, penambahan abu ampas tebu sebanyak 4% menghasilkan peningkatan kekuatan tekan sebesar 9,57% dibandingkan campuran kontrol tanpa bahan tambah. Hal ini menunjukkan adanya kontribusi positif abu ampas tebu dalam meningkatkan kinerja mekanik pada kadar tertentu. Namun demikian, pada variasi penambahan yang lebih tinggi, yaitu 8% dan 12%, terjadi penurunan nilai kuat tekan masing-masing sebesar 3,26% dan 19,35%.



Grafik 4. 3 Kuat tekan rata-rata umur 7 hari
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan grafik kuat tekan umur 7 hari, terlihat bahwa nilai kuat tekan mengalami peningkatan hingga variasi 4%, kemudian menurun pada variasi 8% dan 12%. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada variasi 4% sebesar 5,78 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi 12% sebesar 3,71 MPa.

Pola tersebut menunjukkan bahwa penggunaan abu ampas tebu memiliki kadar optimum pada variasi 4%. Pada kadar tersebut, efek pengisian partikel halus abu ampas tebu masih mampu meningkatkan kepadatan struktur *paving porous*. Sebaliknya, pada kadar yang lebih tinggi, jumlah semen efektif yang tersedia untuk proses hidrasi menjadi berkurang sehingga pembentukan pasta semen tidak berlangsung secara maksimal.

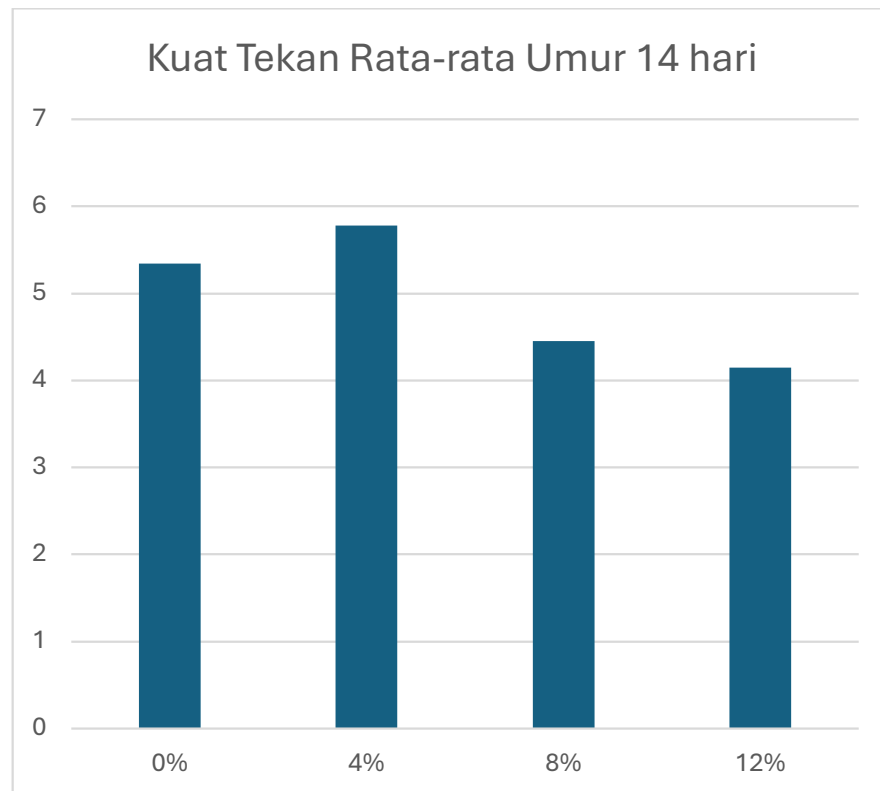
Tabel 4. 14 Hasil Kuat Tekan Umur 14 Hari

No.	Presentase	Umur	Beban Maksimal	Kuat Tekan (Mpa)	Kuat tekan Rata-Rata
			(Ton)		
1	0%	14	13	5.78	5.34
2	0%	14	12	5.34	
3	0%	14	11	4.89	
4	4%	14	14	5.54	5.78
5	4%	14	13	6.65	
6	4%	14	12	5.54	
7	8%	14	10	4.45	4.45
8	8%	14	9	4	
9	8%	14	11	4.89	
10	12%	14	9	4	4.15
11	12%	14	9	4	
12	12%	14	10	4.45	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.14, *paving porous* berumur 14 hari dengan penambahan 4% abu ampas tebu menunjukkan peningkatan kuat tekan sebesar 8,24% dibandingkan dengan komposisi tanpa campuran abu ampas tebu. Sebaliknya, variasi campuran 8% dan 12% mengalami penurunan kuat tekan masing-masing sebesar 16,67% dan 22,28%.

Peningkatan kuat tekan yang terjadi pada umur 14 hari menunjukkan bahwa proses hidrasi semen masih berlangsung sehingga menghasilkan pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang semakin banyak. Variasi 4% tetap menunjukkan nilai kuat tekan tertinggi dengan peningkatan sebesar 12,80% dibandingkan campuran normal. Kondisi ini mengindikasikan bahwa jumlah abu ampas tebu yang relatif kecil masih mampu memberikan efek positif terhadap kepadatan mikrostruktur *paving porous*.



Grafik 4. 4 Kuat tekan rata rata umur 14 hari
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan grafik kuat tekan umur 14 hari, terlihat bahwa pola perubahan kuat tekan masih sama dengan umur 7 hari, yaitu mengalami peningkatan pada variasi 4% dan kemudian menurun pada variasi 8% serta 12%. Variasi 4% menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 6,52 MPa, sedangkan variasi 12% menghasilkan kuat tekan terendah sebesar 4,08 MPa.

Peningkatan kuat tekan pada seluruh variasi dibandingkan umur 7 hari menunjukkan bahwa proses pengerasan *paving porous* masih berlangsung dengan baik. Selain hidrasi semen, reaksi pozzolanik abu ampas tebu mulai memberikan kontribusi terhadap pembentukan senyawa pengikat tambahan yang membantu meningkatkan kekuatan material. Namun demikian, semakin tinggi kadar abu ampas tebu yang digunakan, semakin besar pula pengurangan jumlah semen dalam campuran sehingga kuat tekan cenderung menurun. 22,28%.

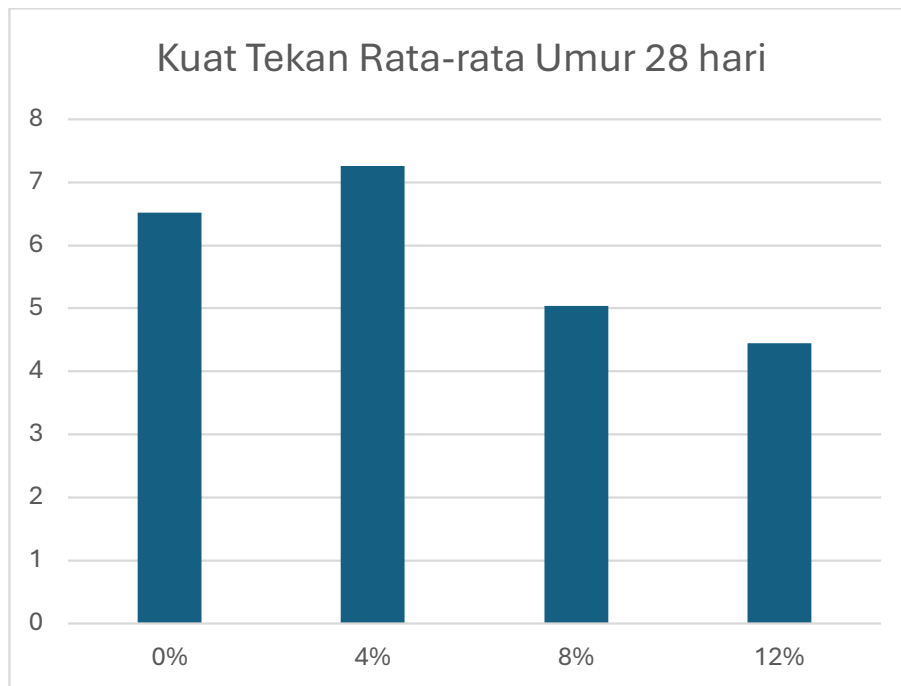
Tabel 4. 15 Hasil Kuat Tekan Umur 28 Hari

No.	Presentase	Umur	Beban Maksimal	Kuat Tekan (Mpa)	Kuat tekan Rata-Rata
			(Ton)		
1	0%	14	15	6.23	6.52
2	0%	14	15	6.67	
3	0%	14	14	6.67	
4	4%	14	17	6.23	7.26
5	4%	14	16	6.67	
6	4%	14	16	6.23	
7	8%	14	11	4.89	5.04
8	8%	14	11	4.89	
9	8%	14	12	5.34	
10	12%	14	9	4	4.45
11	12%	14	9	4	
12	12%	14	12	5.34	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan data Tabel 4.15, pada umur 28 hari, penambahan abu ampas tebu sebanyak 4% menghasilkan peningkatan kuat tekan sebesar 11,35% dibandingkan dengan campuran tanpa bahan tambah. Hal ini menunjukkan adanya kontribusi positif abu ampas tebu dalam meningkatkan kinerja mekanik pada kadar tertentu. Namun demikian, pada variasi penambahan yang lebih tinggi, yaitu 8% dan 12%, terjadi penurunan nilai kuat tekan masing-masing sebesar 19,26% dan 28,80%. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan kadar abu ampas tebu yang berlebihan dapat berdampak negatif terhadap kekuatan struktur *paving porous*.

Meskipun terjadi penurunan pada variasi tertentu, seluruh hasil kuat tekan yang diperoleh masih berada dalam rentang kuat tekan beton porous yang direkomendasikan oleh ACI 522R, yaitu berkisar antara 2,8 MPa hingga 28 MPa. Dengan demikian, seluruh variasi campuran masih dapat dikategorikan memenuhi karakteristik mekanik beton porous.



Grafik 4. 5 Kuat tekan umur 28 hari
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Grafik kuat tekan umur 28 hari, terlihat bahwa nilai kuat tekan meningkat dari variasi 0% menuju variasi 4%, kemudian mengalami penurunan pada variasi 8% dan 12%. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada variasi 4% sebesar 7,26 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi 12% sebesar 4,45 MPa.

Pola tersebut menunjukkan bahwa terdapat kadar optimum penggunaan abu ampas tebu dalam campuran *paving porous*, yaitu sebesar 4% dari berat semen. Pada kadar tersebut, abu ampas tebu mampu memberikan manfaat sebagai bahan pozzolanik dan filler yang meningkatkan kualitas pasta semen serta memperkuat ikatan antar material penyusun campuran. Sebaliknya, pada kadar yang lebih tinggi, jumlah semen yang tergantikan menjadi semakin besar sehingga kemampuan pengikatan campuran menurun dan menyebabkan kuat tekan berkurang.

Selain itu, grafik menunjukkan bahwa pengaruh positif abu ampas tebu terhadap kuat tekan menjadi lebih nyata pada umur 28 hari dibandingkan umur 7 hari dan 14 hari. Kondisi ini mengindikasikan bahwa reaksi pozzolanik abu ampas tebu membutuhkan waktu yang lebih lama untuk berkembang secara optimal. Oleh karena itu, peningkatan kuat tekan

akibat penggunaan abu ampas tebu lebih terlihat pada umur pengujian yang lebih matang..

4.4.2 Daya serap

Pengujian daya serap air dilakukan untuk mengukur kapasitas penyimpanan air pada pori-pori *paving porous*. Prosedur dimulai dengan pengeringan benda uji hingga mencapai berat konstan guna menentukan berat kering. Selanjutnya, benda uji direndam dalam air selama periode tertentu hingga kondisi jenuh tercapai, kemudian diangkat, permukaannya dikeringkan secara teliti untuk menghilangkan air permukaan, dan ditimbang untuk memperoleh berat jenuh. Nilai daya serap dihitung sebagai persentase $((\text{berat jenuh} - \text{berat kering}) / \text{berat kering}) \times 100\%$. Berikut hasil pengujian daya serap.

Tabel 4. 16 Hasil Uji Daya Serap

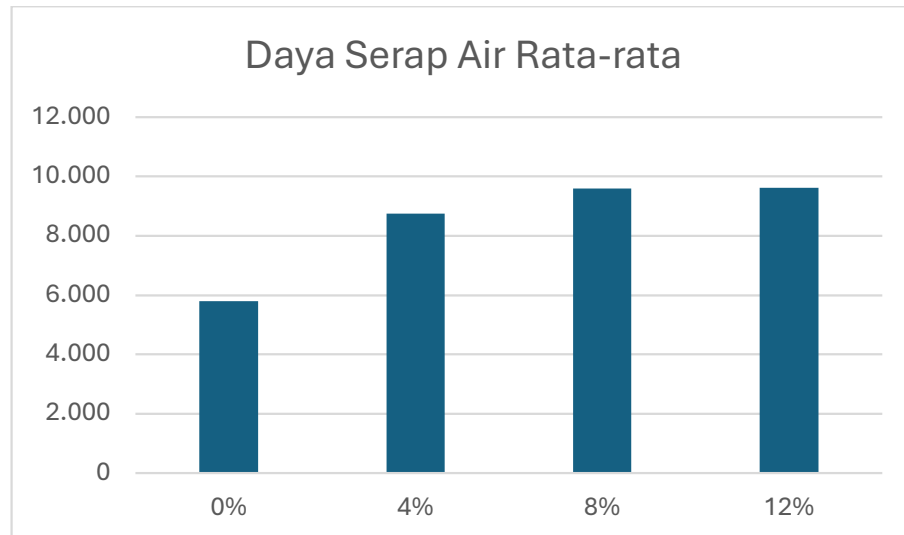
No	Kode Sampel	Berat Kering (gram)	Berat Basah (gram)	Selisih Berat (gram)	Resapan Air (%)	rata-rata
1	V0.1	2834	3011	177	6.2455893	5.78764
2	V0.2	2927	3083	156	5.3296891	
3	V4.1	2883	3149	266	9.2265002	8.75249
4	V4.2	2887	3126	239	8.2784898	
5	V8.1	2781	3041	260	9.349155	9.5984
6	V8.2	2691	2956	265	9.8476403	
7	V12.1	2804	3074	270	9.6291013	9.61604
8	V12.2	2947	3230	283	9.6029861	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.16, penambahan abu ampas tebu pada campuran *paving porous* cenderung meningkatkan nilai daya serap air. Nilai tertinggi dicapai pada variasi 12% abu ampas tebu, yakni 9,6%. Fenomena ini mengindikasikan bahwa peningkatan proporsi abu ampas tebu berkontribusi pada porositas material yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan kapasitas penyerapan air.

Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa abu ampas tebu berkontribusi terhadap peningkatan porositas *paving porous*. Semakin tinggi kadar abu ampas tebu yang digunakan, semakin besar pula jumlah rongga yang terbentuk sehingga air lebih mudah masuk dan tersimpan di

dalam material. Kondisi ini sejalan dengan karakteristik dasar *paving porous* yang dirancang untuk meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah. Akan tetapi, peningkatan daya serap yang terlalu tinggi juga berpotensi menyebabkan penurunan kuat tekan karena semakin banyak rongga yang terbentuk di dalam struktur material.



Grafik 4. 6 Daya serap air rata rata
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan grafik 4.5, terlihat adanya tren peningkatan yang cukup konsisten pada seluruh variasi campuran abu ampas tebu. Nilai daya serap meningkat sebesar 51,38% pada variasi 4%, 65,92% pada variasi 8%, dan 66,44% pada variasi 12% dibandingkan campuran normal.

Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa abu ampas tebu berkontribusi terhadap peningkatan porositas *paving porous*. Semakin tinggi kadar abu ampas tebu yang digunakan, semakin besar pula jumlah rongga yang terbentuk sehingga air lebih mudah masuk dan tersimpan di dalam material. Kondisi ini sejalan dengan karakteristik dasar *paving porous* yang dirancang untuk meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah

4.4.3 Permeabilitas

Pengujian permeabilitas *paving porous* dengan metode falling head yang mengacu pada pedoman ACI 522R merupakan prosedur eksperimental yang digunakan untuk menentukan kemampuan material dalam

meloloskan aliran air melalui struktur porinya pada kondisi aliran tak jenuh penuh secara bertahap. Metode ini dipilih karena sesuai untuk material berpori dengan permeabilitas sedang hingga tinggi, seperti *paving porous*, yang memiliki jaringan pori saling terhubung. hubungan antara perubahan tinggi muka air, waktu aliran, panjang benda uji, serta luas penampang aliran. Secara umum, perhitungan koefisien permeabilitas pada metode ini dinyatakan dalam bentuk logaritmik terhadap rasio tinggi muka air awal dan akhir, yang mencerminkan karakteristik aliran fluida melalui media berpori.

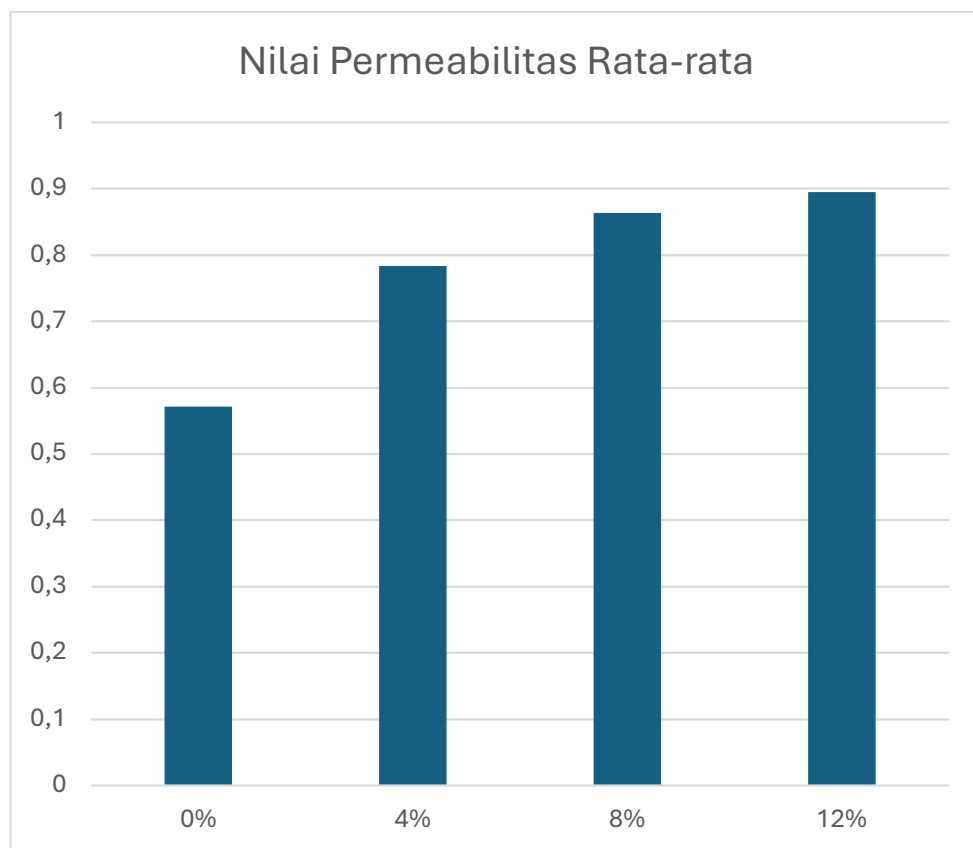
Tabel 4. 17 Hasil Uji Permeabilitas

Kode Sampel	Luas penampang alat (m ²)	Tinggi Sample (m)	Luas Penampang sample (m ²)	Waktu (s)	Tinggi Awal Air (h1) (m)	Tinggi Akhir Air (h2) (m)	log (h1/h2)	Koefisien Permeabilitas (m/s)	Konversi cm/s	rata-rata
V0.1	0.02365	0.08	0.02205	9.71	0.08	0.02	0.6021	0.005320263	0.53202627	0.571
V0.2	0.02365	0.08	0.02205	8.90	0.08	0.02	0.6021	0.005804466	0.58044664	
V0.3	0.02365	0.08	0.02205	8.60	0.08	0.02	0.6021	0.006006948	0.60069478	
V4.1	0.02365	0.08	0.02205	6.62	0.08	0.02	0.6021	0.007803588	0.78035877	0.783
V4.2	0.02365	0.08	0.02205	6.53	0.08	0.02	0.6021	0.007911141	0.79111141	
V4.3	0.02365	0.08	0.02205	6.64	0.08	0.02	0.6021	0.007780083	0.77800829	
V8.1	0.02365	0.08	0.02205	6.16	0.08	0.02	0.6021	0.008386323	0.83863232	0.863
V8.2	0.02365	0.08	0.02205	5.85	0.08	0.02	0.6021	0.008830727	0.88307266	
V8.3	0.02365	0.08	0.02205	5.95	0.08	0.02	0.6021	0.008682311	0.8682311	
V12.1	0.02365	0.08	0.02205	6.07	0.08	0.02	0.6021	0.008510667	0.85106673	0.895
V12.2	0.02365	0.08	0.02205	5.54	0.08	0.02	0.6021	0.009324865	0.93248648	
V12.3	0.02365	0.08	0.02205	5.74	0.08	0.02	0.6021	0.008999957	0.8999996	

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Tabel 4.14, nilai permeabilitas rata-rata *paving porous* mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar abu ampas tebu. Variasi 0% menghasilkan permeabilitas sebesar 0,57 cm/detik, sedangkan variasi 4%, 8%, dan 12% masing-masing menghasilkan nilai 0,78 cm/detik, 0,86 cm/detik, dan 0,89 cm/detik.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan abu ampas tebu mampu meningkatkan kemampuan *paving porous* dalam meloloskan air. Seluruh variasi campuran masih memenuhi rentang permeabilitas yang direkomendasikan oleh ACI 522R-10 yaitu 0,1–1,22 cm/detik. Dengan demikian, penggunaan abu ampas tebu tidak mengurangi fungsi hidrolisik *paving porous*, bahkan mampu meningkatkan kapasitas drainase material melalui pembentukan pori-pori yang saling terhubung.



Grafik 4. 7 Nilai Permeabilitas rata rata
(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Berdasarkan Grafik nilai permeabilitas rata-rata, terlihat bahwa semakin tinggi kadar abu ampas tebu yang digunakan, semakin besar pula nilai permeabilitas *paving porous*. Nilai permeabilitas meningkat dari 0,57 cm/detik pada campuran normal menjadi 0,78 cm/detik pada variasi 4%, kemudian meningkat lagi menjadi 0,86 cm/detik pada variasi 8% dan mencapai nilai tertinggi sebesar 0,89 cm/detik pada variasi 12%.

Peningkatan ini menunjukkan bahwa abu ampas tebu berkontribusi terhadap terbentuknya jaringan pori yang lebih terbuka dan saling terhubung sehingga air dapat mengalir lebih cepat melalui material. Hasil tersebut memperlihatkan adanya hubungan yang berbanding lurus antara porositas, daya serap air, dan permeabilitas. Namun, peningkatan permeabilitas tersebut juga diikuti oleh penurunan kuat tekan pada variasi yang lebih tinggi, sehingga menunjukkan adanya trade-off antara kinerja mekanik dan kinerja hidrolis *paving porous*.

4.5 Pembahasan Hasil

Paving porous merupakan salah satu alternatif material perkerasan ramah lingkungan yang efektif dalam mengelola limpasan air permukaan, khususnya pada aplikasi trotoar. Struktur berpori yang menjadi karakteristik utama *paving porous* memungkinkan infiltrasi air hujan ke dalam tanah, sehingga dapat meminimalkan risiko genangan air dan mengurangi beban pada sistem drainase konvensional. Dalam penelitian ini, *paving porous* dirancang untuk aplikasi trotoar dengan target kuat tekan 15 MPa pada umur 28 hari.

Selain kekuatan, parameter penting lain dalam *paving porous* adalah porositas. Nilai porositas yang direncanakan tidak melebihi 20% bertujuan untuk menjaga keseimbangan antara kemampuan infiltrasi air dan stabilitas struktural. Porositas yang terlalu tinggi dapat meningkatkan daya serap dan permeabilitas, namun berpotensi menurunkan kuat tekan material. Sebaliknya, porositas yang terlalu rendah akan mengurangi efektivitas sistem drainase.

Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa penambahan abu ampas tebu memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan *paving porous* dalam menahan beban tekan. Berdasarkan data penelitian, variasi penambahan abu ampas tebu sebesar 4% menghasilkan nilai kuat tekan tertinggi pada seluruh umur pengujian. Pada umur 7 hari terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 9,57%, pada umur 14 hari sebesar 8,24%, dan pada umur 28 hari sebesar 11,35% dibandingkan dengan campuran normal tanpa abu ampas tebu. Peningkatan ini menunjukkan bahwa abu ampas tebu yang telah diolah melalui proses pengovenan dan penyaringan hingga lolos saringan No. 200 mampu berperan sebagai material *pozzolan* yang bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen dan membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan *paving porous*. Namun, pada variasi 8% dan 12% terjadi penurunan kuat tekan. Kondisi tersebut

menunjukkan bahwa penggunaan abu ampas tebu dalam jumlah yang terlalu besar menyebabkan berkurangnya kandungan semen efektif yang berfungsi sebagai bahan pengikat utama, sehingga proses hidrasi tidak berlangsung secara optimal. Nilai kuat tekan yang diperoleh pada seluruh variasi campuran masih berada dalam rentang kuat tekan *paving porous* menurut ACI 522R-10, yaitu 2,8–28 MPa. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Risma et al. (2025) yang menyatakan bahwa penambahan SCBA pada kadar tertentu mampu meningkatkan kuat tekan paving block, serta penelitian Muharja et al. (2023) yang memperoleh kuat tekan optimum pada penggunaan SCBA sebesar 10%. Selain itu, hasil penelitian ini juga mendukung temuan Pranowo et al. (2022) yang melaporkan bahwa penggunaan abu ampas tebu sebagai substitusi sebagian semen dapat meningkatkan kuat tekan material akibat aktivitas pozzolanik yang dimiliki oleh abu ampas tebu.

Berdasarkan hasil pengujian daya serap air, diperoleh kecenderungan bahwa peningkatan kadar abu ampas tebu menyebabkan meningkatnya kemampuan *paving porous* dalam menyerap air. Nilai daya serap tertinggi diperoleh pada variasi penambahan abu ampas tebu sebesar 12% dengan nilai sebesar 9,6%. Peningkatan daya serap ini menunjukkan bahwa penambahan abu ampas tebu menyebabkan bertambahnya jumlah pori dan rongga dalam struktur *paving porous*. Abu ampas tebu yang memiliki ukuran partikel sangat halus dapat memengaruhi susunan matriks pasta semen dan agregat sehingga menghasilkan struktur internal yang lebih berpori. Bertambahnya porositas tersebut memungkinkan air lebih mudah masuk dan tersimpan di dalam material. Meskipun nilai daya serap mengalami peningkatan, nilai daya serap yang diperoleh tidak memenuhi rentang yang direkomendasikan oleh standar ACI 522R-10 untuk *paving porous*, yaitu sebesar 15–35%. Hasil penelitian ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Oktavia et al. (2023) yang menyatakan bahwa peningkatan kadar abu ampas tebu menyebabkan kenaikan daya serap air pada paving block. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Ulum dan Imaduddin (2021) yang menunjukkan bahwa penggunaan SCBA meningkatkan penyerapan air akibat bertambahnya pori-pori dalam struktur material.

Hasil pengujian permeabilitas menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran memenuhi persyaratan permeabilitas menurut ACI 522R-10, yaitu berada pada rentang 0,1–1,22 cm/detik. Nilai permeabilitas tertinggi

diperoleh pada variasi penambahan abu ampas tebu sebesar 12%, yaitu sebesar 0,89 cm/detik. Peningkatan nilai permeabilitas seiring bertambahnya kadar abu ampas tebu menunjukkan bahwa material tersebut berkontribusi terhadap pembentukan sistem pori yang saling terhubung sehingga memudahkan aliran air melewati lapisan *paving porous*.

Tabel 4. 18 Rekap Hasil Uji *Paving porous* Umur 28 hari

Variasi Campuran	Kuat Tekan Mpa	Daya Serap Air (0%)	Permeabilitas (cm/dtk)
0	6.52	5.78	0.57
4	7.26	8.75	0.78
8	5.04	9.59	0.86
12	4.45	9.62	0.89

(Sumber : Data Olahan Peneliti, 2026)

Secara keseluruhan, hasil penelitian mengungkap adanya interaksi timbal balik antara kuat tekan, porositas, permeabilitas, dan daya serap pada *paving porous*. Penambahan abu ampas tebu memberikan kontribusi signifikan terhadap perubahan karakteristik tersebut. Oleh karena itu, diperlukan komposisi campuran yang optimum agar diperoleh *paving porous* dengan kinerja mekanik yang memadai sekaligus memiliki kemampuan drainase yang baik sesuai dengan standar yang berlaku.

Penelitian ini menunjukkan bahwa abu ampas tebu memiliki potensi sebagai material substitusi ramah lingkungan pada *paving porous* dengan keseimbangan optimum antara kekuatan mekanik dan kemampuan infiltrasi air pada kadar 4%