

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam menyusun landasan teori tugas akhir ini, peneliti merujuk pada sejumlah penelitian terdahulu yang relevan dengan topik pemanfaatan limbah abu ampas tebu sebagai bahan tambah dalam campuran *Paving porous*. Berdasarkan kajian literatur dari berbagai sumber jurnal, belum ditemukan penelitian yang memiliki fokus identik dengan studi ini. Berbagai penelitian yang telah dilakukan pada umumnya mengkaji pengaruh variasi penggunaan SCBA terhadap sifat mekanik paving block, seperti kuat tekan, daya serap air, dan ketahanan aus, dengan hasil yang menunjukkan variasi terhadap tingkat kekuatan maupun porositas material. Keterbatasan penelitian terkait penggunaan bahan tambah pada *paving porous* mendorong kajian lebih lanjut mengenai pemanfaatan abu ampas tebu sebagai substitusi semen guna mendukung pengembangan material konstruksi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Beberapa penelitian terdahulu yang menjadi rujukan adalah sebagai berikut.

Penelitian terdahulu oleh Morib et al. (2025) berjudul “Pengaruh Abu Ampas Tebu Sebagai Substitusi Parsial Semen Terhadap Karakteristik Beton SCC”, menunjukkan bahwa penambahan SCBA meningkatkan viskositas beton segar sehingga menurunkan workabilitas dan menyebabkan campuran tidak memenuhi kriteria SCC, kecuali pada beton kontrol. Namun, SCBA mampu meningkatkan kuat tekan beton dengan nilai optimum sebesar 29,04 MPa pada variasi 5% AAT. Selain itu, kuat tarik beton berada pada kisaran 10,5%–13,6% dari kuat tekan, sedangkan modulus elastisitas cenderung menurun seiring peningkatan kadar SCBA.

Menurut Rambe et al. dalam penelitian berjudul “Beton Ramah Lingkungan dengan Ampas Tebu sebagai Substitusi Parsial Semen”, penggunaan serbuk ampas tebu sebagai substitusi parsial semen dengan variasi 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar serbuk ampas tebu yang digunakan, semakin rendah kuat tekan beton yang dihasilkan. Nilai kuat tekan rata-rata yang diperoleh berturut-turut adalah 24,08 MPa, 21,98 MPa, 17,67 MPa, 14,54 MPa, dan 11,66 MPa.

Penelitian terdahulu oleh Risma et al. (2025) berjudul “Mix Design *Paving block* Dengan Ampas Tebu Sebagai Bahan Tambah”, mengeksplorasi variasi penambahan ampas tebu yang digunakan untuk pembuatan *Paving*

block menggunakan metode DOE, Temuan penelitian mengindikasikan bahwa kekuatan tekan maksimum dicapai pada variasi 5%, yakni 5,14 MPa, dengan formulasi campuran mencakup semen 0,793 kg, pasir 2,202 kg, serta SCBA 0,050 kg. Sebaliknya, daya serap air dan kekuatan lentur optimal diperoleh pada variasi 10%, dengan komposisi semen 0,793 kg, pasir 2,086 kg, dan SCBA 0,100 kg.

Mahmud et al. (2023) meneliti pengaruh abu ampas tebu sebagai bahan pengganti sebagian semen terhadap sifat mekanik beton dengan variasi substitusi sebesar 0%, 5%, 7,5%, 10%, dan 12,5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar abu ampas tebu menyebabkan penurunan kuat tekan beton. Kuat tekan beton umur 28 hari menurun dari 24,14 MPa pada beton normal menjadi 17,20 MPa, 14,98 MPa, 11,93 MPa, dan 9,71 MPa pada variasi 5%, 7,5%, 10%, dan 12,5%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan abu ampas tebu sebagai pengganti semen di atas 5% tidak direkomendasikan karena menurunkan sifat mekanik beton secara signifikan.

Menurut hasil penelitian terdahulu oleh Muharja et al. (2023) yang berjudul “Optimalisasi Pemanfaatan Abu Ampas Tebu Untuk Pembuatan *Paving block*”, menunjukkan bahwa waktu pengeringan sangat mempengaruhi kuat tekan *Paving block*, semakin lama waktu pengeringan semakin tinggi kuat tekan paving tersebut. Hasil optimal diperoleh pada *Paving block* dengan penggunaan abu ampas tebu 10% dari berat pasir pada umur 10 hari dengan kuat tekan sebesar 19 MPa.

Penelitian terdahulu oleh Sianturi & Raiz (2023) yang berjudul “Analisis Pengaruh Abu Ampas Tebu dan Superplasticizer Terhadap Sifat Mekanik Beton Mutu Tinggi”, mengkaji pengaruh penggunaan abu ampas tebu dan superplasticizer terhadap sifat mekanik beton mutu tinggi dengan variasi abu ampas tebu sebesar 0%, 1,5%, 3%, dan 4,5%. Hasil penelitian Nilai kuat tekan beton umur 28 hari menurun dari 39,97 MPa pada beton kontrol menjadi 25,88 MPa, 23,88 MPa, dan 18,89 MPa pada variasi abu ampas tebu 1,5%, 3%, dan 4,5%. Kuat tekan optimum pada campuran abu ampas tebu diperoleh pada variasi 1,5% abu ampas tebu dan 0,4% superplasticizer dengan nilai kuat tekan sebesar 25,88 MPa.

Menurut hasil penelitian terdahulu oleh Oktavia et al. (2023) yang berjudul “Investigasi Pemanfaatan Tanah Lempung Dan Abu Ampas Tebu Dalam Pembuatan *Paving block*”, *Paving block* dengan campuran 5% SCBA menunjukkan daya serap air 29,994%, kuat tekan tertinggi pada suhu pemanasan 100°C selama 120 menit sebesar 24,263 Kg/Cm², dan beban kejut pada suhu 125°C selama 100 menit serta 150°C selama 60 menit sebesar 105,95

joule. Pada campuran 15% SCBA, terjadi peningkatan daya serap air serta penurunan kuat tekan dan beban kejut *Paving block*.

Penelitian terdahulu oleh Nurul Rochmah et al. (2022) yang berjudul “Pengaruh Abu Sekam Sebagai Substitusi Semen Pada Kuat Tekan Flowing Concrete”, bertujuan untuk memperoleh kuat tekan maksimum pada *flowing concrete* dengan variasi substitusi abu sekam padi sebesar 0%, 5%, 7,5%, 10%, dan 12,5% serta penggunaan superplasticizer 1,5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan maksimum sebesar 26,53 MPa dicapai pada campuran dengan substitusi abu sekam padi 10%.

Menurut hasil penelitian terdahulu oleh Pranowo et al. (2022) yang berjudul “Pengaruh Penggunaan Abu Ampas Tebu sebagai Pengganti Sebagian Semen Ditinjau Terhadap Kuat Tekan Mortar”, Penggunaan SCBA menyebabkan waktu ikat awal semen menjadi lebih lama dibandingkan semen tanpa campuran. Penambahan SCBA sebesar 7%, 9%, dan 11% masing-masing memperlambat waktu ikat awal sebesar 30 menit, 43,73 menit, dan 41,67 menit. Selain itu, kuat tekan mortar dengan SCBA menunjukkan peningkatan dibandingkan mortar normal, dengan persentase kenaikan berturut-turut sebesar 38,24%, 32,59%, dan 33,15%.

Menurut hasil penelitian Ulum dan Imaduddin (2021) yang berjudul “Pengaruh Penggunaan Abu Ampas Tebu sebagai Bahan Substitusi Sebagian Semen pada Campuran Paving Block dengan Tambahan Bottom Ash 10% sebagai Bahan Substitusi Pasir”, penggunaan abu ampas tebu (SCBA) sebesar 5% dan bottom ash sebesar 10% berpengaruh terhadap karakteristik paving block. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar SCBA menyebabkan penurunan kuat tekan. Kuat tekan paving block menurun dari 26,327 MPa pada campuran normal menjadi 16,033 MPa pada campuran dengan 5% SCBA dan 10% bottom ash, atau mengalami penurunan sebesar 39,1%. Selain itu, daya serap air dan ketahanan aus mengalami peningkatan dibandingkan campuran normal.

Rancangan penelitian yang akan dilaksanakan oleh peneliti berjudul “Pemanfaatan Limbah Abu Ampas Tebu pada Campuran *Paving porous*”. Penelitian ini disusun dengan mengacu pada berbagai penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar konseptual dan empiris dalam pelaksanaan studi. Tinjauan pustaka tersebut memiliki peranan penting dalam penyusunan kerangka berpikir penelitian, penentuan arah serta pendekatan metodologi, penetapan parameter pengujian, dan pembatasan ruang lingkup penelitian agar tetap terarah dan sistematis.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Nama	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Morib et al., 2025	Pengaruh Abu Ampas Tebu Sebagai Substitusi Parsial Semen Terhadap Karakteristik Beton SCC	Pengujian eksperimen, Variasi penambahan SCBA 2,5%, 5%, 7,5%, 10% dan 12,5%	▪ Kuat tekan optimum 29,4 Mpa pada 5% SCBA ▪ Kuat Tarik Maksimum senilai 13%
2.	Rambe et al., 2025	Beton Ramah Lingkungan dengan Ampas Tebu sebagai Substitusi Parsial Semen	Pengujian eksperimen, Variasi penambahan SCBA 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%	▪ Kuat tekan beton umur 28 hari menurun dari 24,08 MPa pada beton normal menjadi 22 MPa, 17,67 MPa, 14,5 MPa, dan 11,66 MPa pada variasi 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%
3.	Risma et al. 2025	Mix Design <i>Paving block</i> Dengan Ampas Tebu Sebagai Bahan Tambah	Pengujian eksperimen, Variasi penambahan SCBA 5% dan 10%,	▪ Kuat tekan optimum 5,14 Mpa pada campuran 5% SCBA ▪ Daya serap air optimum pada campuran 10% SCBA, sebesar 17,6%

(Sumber : Data Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (lanjutan)

No.	Nama	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
4.	Mahmud et al ., 2023	Pengaruh Abu Ampas Tebu Sebagai Bahan Pengganti Semen Terhadap Sifat-sifat Mekanik Beton	Pengujian eksperimen, Variasi penambahan SCBA 5%, 7,5%, 10% dan 12,5%	Kuat tekan beton umur 28 hari menurun dari 24,14 MPa pada beton normal menjadi 17,20 MPa, 14,98 MPa, 11,93 MPa, dan 9,71 MPa pada variasi 5%, 7,5%, 10%, dan 12,5% .
5.	Muharja et al., 2023	Optimalisasi Pemanfaatan Abu Ampas Tebu Untuk Pembuatan <i>Paving block</i>	Pengujian eksperimen, Variasi SCBA 10%, 20% dan 30%	kuat tekan optimum paving blok tercapai pada campuran SCBA variasi 10% setelah 10 hari yaitu 19 Mpa
6.	Sianturi & Raiz 2023	Analisis Pengaruh Abu Ampas Tebu dan Superplasticizer Terhadap Sifat Mekanik Beton Mutu Tinggi	Pengujian eksperimen, Variasi SCBA 0%, 1,5%, 3% dan 4,5%	Kuat tekan optimum sebesar 25,88 Mpa pada campuran 1,5% SCBA dan 0,4 Superplasticizer
7.	Oktavia et al. 2023	Investigasi pemanfaatan tanah lempung Dan Abu Ampas Tebu Dalam Pembuatan <i>Paving block</i>	Pengujian eksperimen, Variasi SCBA 0%, 5% dan 15%	Kuat tekan optimum 24,263 Kg/Cm² pada campuran 5% SCBA dan daya serap optimum 31,05% pada campuran 15% SCBA

(Sumber : Data Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (lanjutan)

No.	Nama	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
8	Nurul Rochmah et al., 2022	Pengaruh Abu Sekam Sebagai Substitusi Semen Pada Kuat Tekan Flowing Concrete	Pengujian eksperimen, Variasi 0%, 5%, 7,5%, 10% dan 12,5%	▪ kuat tekan maksimum sebesar 26,53 MPa dicapai pada campuran dengan substitusi abu sekam padi 10%.
9	Pranowo et al., 2022	Pengaruh Penggunaan Abu Ampas Tebu sebagai Pengganti Sebagian Semen Ditinjau Terhadap Kuat Tekan Mortar	Pengujian eksperimen, Variasi penambahan SCBA 0%, 7%, 9% dan 11%	▪ Waktu ikat awal semen yang menggunakan abu ampas tebu lebih lama dari semen tanpa campuran abu ampas tebu ▪ Nilai kuat tekan mortar yang menggunakan abu ampas tebu lebih tinggi dari mortar normal dengan persentase kenaikan 38,24%, 32,59%, dan 33,15% lebih tinggi dari mortar normal
10	Ulum & Imaduddin, 2021	Pengaruh Penggunaan Abu Ampas Tebu Sebagai Bahan Substitusi Sebgai Semen Pada Campuran <i>Paving block</i> Dengan Tambahan Bottom Ash 10 % Sebagai	Pengujian eksperimen, Variasi penambahan SCBA 0%, 5%, 10%, 15%, 20% dan 25%	▪ Penambahan SCBA menyebabkan penurunan kuat tekan, tetapi peningkatan penyerapan air dan ketahanan aus ▪ Campuran 5% SCBA + 10% bottom ash: kuat tekan turun 39,1% (16,03 MPa),

(Sumber : Data Data Olahan Peneliti, 2026)

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu (lanjutan)

No.	Nama	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
		Bahan Substitusi Pasir		penyerapan air naik 60,1%
11	Erwansyah 2026	Pemanfaatan Limbah Abu Ampas Tebu Pada Campuran <i>Paving porous</i>	Pengujian eksperimen, Variasi SCBA 0%, 4%, 8% dan 12%	- Penambahan SCBA 4% menyebabkan kenaikan kuat tekan sebesar 11,35% - Nilai daya serap air optimal pada Variasi 12% sebesar 9,61% - Nilai Permeabilitas Optimal pada Variasi 12% sebesar 0,89 cm/detik

(Sumber : Data Data Olahan Peneliti, 2026)

2.2 *Paving block*

Paving block merujuk pada material konstruksi yang difungsikan sebagai pelapis permukaan pada jalan raya, trotoar, atau zona lain yang membutuhkan kestabilan dan kekerasan permukaan. Material ini pada umumnya dibuat dari campuran beton yang dicetak menggunakan cetakan khusus serta dirancang untuk memiliki ketahanan terhadap beban lalu lintas, pengaruh cuaca, dan tingkat keausan. Berdasarkan SNI 03-0691-1996, paving block didefinisikan sebagai elemen bangunan yang dibentuk dari campuran semen Portland atau perekat hidrolis lainnya, air, serta agregat, dengan atau tanpa aditif tambahan yang tidak merusak kualitasnya.

Produksi *paving block* mengandalkan formulasi utama yang meliputi semen Portland, pasir sebagai agregat halus, kerikil atau agregat kasar, serta air yang berfungsi sebagai medium pengikat selama proses pembentukan material. Selain itu, bahan tambahan seperti *plasticizer* dapat digunakan untuk meningkatkan performa material, terutama dalam

menghadapi siklus pembekuan dan pencairan. Selain itu, pewarna atau pigmen dapat digunakan untuk tujuan estetika. Secara konvensional, *paving block* memiliki dimensi ketebalan sekitar 6 cm untuk area dengan beban lalu lintas ringan, sedangkan ketebalan yang lebih besar digunakan pada area dengan beban yang lebih berat. (Saputri et al., 2023).



Gambar 2. 1 *Paving block*

(Sumber : Sri Wiwoho Mudjanarko, 2018)

Proses pembuatan *Paving block* dapat dilakukan melalui metode konvensional yang sederhana dan berbiaya rendah, maupun metode mekanis yang menggunakan mesin press untuk produksi massal dengan kualitas seragam. Setelah pencetakan, *Paving block* mengalami tahap perawatan (*curing*) dengan penyiraman air tawar guna memastikan reaksi hidrasi semen berjalan optimal sehingga meningkatkan kekuatan tekan material. Pengujian terhadap produk mencakup uji kuat tekan serta uji daya serap air guna memastikan bahwa *Paving block* memenuhi ketentuan standar SNI. Parameter kuat tekan menggambarkan kemampuan *Paving block* dalam menahan beban maksimum sebelum mengalami kerusakan, sehingga menjadi indikator utama kualitas dan aspek keselamatannya.

2.2.1 Klasifikasi *Paving block*

Menurut SNI T-04-1990-F klasifikasi *Paving block* didasarkan pada bentuk, ketebalan, kekuatan, dan warna. Klasifikasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Klasifikasi berdasarkan bentuk

Berdasarkan bentuknya *Paving block* diklasifikasikan menjadi dua yaitu *Paving block* berbentuk segiempat (*rectangular*) dan segi banyak, seperti segienam dan segi duabelas.

2. Klasifikasi berdasarkan ketebalan

Paving block diklasifikasikan ke dalam berbagai jenis berdasarkan tingkat ketebalannya. Secara umum, *Paving block* dibedakan menjadi tiga kategori utama sesuai dengan fungsi atau penerapannya. Ketebalan yang paling sering dipakai adalah 60 mm, 80 mm, serta 100 mm, dengan batas toleransi sebesar $\pm 8\%$.

3. Klasifikasi berdasarkan kekuatan

Paving block diklasifikasikan berdasarkan tingkat kekuatannya ke dalam dua kategori, yaitu paving block dengan mutu beton f_c' (kuat tekan) sekitar 37,35 MPa dan paving block dengan mutu beton f_c' sekitar 27,0 MPa.

4. Klasifikasi berdasarkan warna

Paving block tersedia dalam berbagai pilihan warna, seperti abu-abu, hitam, dan merah. Selain itu, *Paving block* juga menawarkan warna-warna lain yang umumnya dimanfaatkan untuk fungsi pembatas.

2.2.2 Syarat Mutu *Paving block*

Syarat mutu untuk membuat *Paving block* untuk lantai menurut SNI 03-0691 1996 adalah sebagai berikut :

1. Secara tampak *Paving block* diharuskan memiliki permukaan yang rata, bebas dari retakan maupun kerusakan, serta bagian tepi sudut dan rusuknya tidak rentan hancur hanya dengan kekuatan tangan.
2. *Paving block* harus mempunyai ukuran tebal nominal minimum 6cm dengan toleransi 8%
3. *Paving block* harus mempunyai sifat-sifat fisika seperti table berikut

Tabel 2.2 Syarat Mutu *Paving block*

Mutu	Klasifikasi	Kuat takan (Mpa)		Ketahanan Aus (mm/menit)		Penyerapan air rata-rata (%)
		Rata-rata	Min	Rata-rata	Min	
A	Jalan	40	35	40	35	3
B	Parkir	20	17	20	17	6
C	Pejalan kaki	15	12.5	15	12.5	8
D	Taman	10	10	10	10	10

(Sumber : SNI 03-0691 1996)

2.3 *Paving porous*

Paving porous merupakan varian *Paving block* yang dirancang dengan tingkat porositas tinggi, sehingga memungkinkan air hujan maupun air permukaan lainnya meresap melalui lapisan *paving* dan kembali ke dalam tanah. Karakteristik ini membedakannya dari *Paving block* konvensional yang umumnya bersifat lebih kedap air. (Elizondo-Martinez et al., 2020).

Struktur rongga atau pori yang saling berhubungan di dalam paving memungkinkan peresapan air yang lebih baik, sehingga membantu mengurangi limpasan permukaan, mencegah genangan banjir, dan menjaga keseimbangan muka air tanah. Kadar pori yang tinggi ini juga membuat *Paving porous* memiliki permeabilitas air yang tinggi dan kemampuan drainase yang baik, sehingga sangat cocok diaplikasikan di area dengan risiko genangan air tinggi seperti taman, jalan lingkungan, dan pedestrian



Gambar 2. 2 *Paving porous*
(Sumber : Darren Matthew , 2025)

Fungsi utama *Paving porous* adalah sebagai lapisan perkerasan yang tidak hanya menahan beban lalu lintas, tetapi juga mengelola air hujan secara ekologis dengan mengizinkan air meresap kembali ke tanah. Dengan demikian, *Paving porous* berkontribusi pada pengurangan limpasan air yang menyebabkan banjir dan erosi, serta membantu pengisian ulang air tanah. Keuntungan lain adalah mengurangi permukaan jalan yang licin saat hujan karena air dapat cepat meresap, meningkatkan keselamatan pengguna jalan. *Paving porous* juga dapat mengurangi kebutuhan sistem drainase yang rumit dan mahal, sehingga secara ekonomi lebih efisien dalam jangka Panjang

Paving porous diproduksi menggunakan campuran beton khusus yang meminimalkan penggunaan agregat halus sehingga ruang antara komponen agregat tetap terbuka. Beton jenis ini umumnya memanfaatkan

semen Portland, agregat kasar, sedikit agregat halus, serta jumlah air yang disesuaikan agar struktur yang dihasilkan memiliki tingkat porositas yang tinggi. Pemanfaatan material tambahan seperti *fly ash* atau abu terbang dapat meningkatkan sifat mekanik *Paving porous* tanpa mengurangi tingkat permeabilitasnya. Dalam proses pembuatannya, pengendalian rasio air–semen menjadi aspek krusial, karena kondisi campuran yang terlalu basah dapat menutup pori-pori, sedangkan campuran yang terlalu kering dapat menyulitkan proses pengerjaan (Ciawi et al., 2022). Kuat tekan *Paving porous* biasanya lebih rendah dibandingkan *paving* konvensional karena adanya rongga udara di dalamnya, sehingga penggunaannya dibatasi pada lalu lintas ringan sampai sedang seperti jalan kecil, lahan parkir, dan trotoar.

Dari segi ekonomis harga *Paving block* konvensional lebih murah daripada *Paving porous*. Namun *Paving porous* dapat memberikan penghematan jangka panjang dengan mengurangi kerusakan akibat banjir dan mengurangi kebutuhan akan sistem drainase terpisah.

Tabel 2.3 Perbandingan harga *Paving block* dengan *Paving porous*

Tipe	Ukuran	Tebal	Mutu	Harga jual
<i>Paving block</i>	21 cm . 10,5 cm	8cm	K-225	Rp. 80.500
	21 cm . 10,5 cm	8cm	K-250	Rp. 90.500
	21 cm . 10,5 cm	8cm	K-300	Rp. 100.500
<i>Paving porous</i>	21 cm . 10,5 cm	8cm	K-225	Rp. 130.000
	21 cm . 10,5 cm	8cm	K-250	Rp. 135.000
	21 cm . 10,5 cm	8cm	K-300	Rp. 140.000

(Sumber :PT. Udpsuperblock,2026)

2.4 Keunggulan dan Kelemahan *Paving porous*

Dalam penerapannya *Paving porous* memiliki keunggulan dan kelemahan. Adapun keunggulan dan kelemahan *Paving porous* menurut Faizal et al. (2024) sebagai berikut :

a. Keunggulan *Paving porous*

1. *Paving porous* siap digunakan segera setelah pemasangan, tanpa memerlukan proses pengerasan yang Panjang

2. Biaya produksi dan instalasinya lebih terjangkau dibandingkan dengan opsi perkerasan permukaan lainnya
 3. Kapasitas penyerapan air yang optimal membantu mengurangi risiko genangan di area perkerasan
 4. Ragam desain dan bentuk yang tersedia memungkinkan penciptaan permukaan dengan nilai estetika yang menonjol dan fleksibel
 5. Proses pemasangannya relatif mudah dan tidak bergantung pada peralatan berat, sehingga mendukung produksi dalam skala besar
- b. Kelemahan *Paving porous*
1. Pada fondasi yang kurang kokoh, *Paving porous* cenderung mengalami deformasi bergelombang dengan mudah.
 2. Kesalahan dalam proses pemasangan sering menyebabkan *Paving porous* terlepas dari sambungannya, sehingga menghasilkan permukaan perkerasan yang tidak rata.
 3. Ruang antar *Paving porous* berpotensi menjadi lokasi tumbuhnya gulma atau vegetasi liar apabila tidak dilakukan pemeliharaan yang memadai. Oleh sebab itu, diperlukan perawatan berkala untuk memastikan area tersebut tetap terjaga dan bebas dari pertumbuhan gulma.

2.5 Material Penyusun *Paving porous*

Kualitas *Paving porous* sangat dipengaruhi oleh pemilihan bahan utama, bahan pendukung, metode produksi, serta peralatan yang digunakan. Mutu bahan baku yang baik, perencanaan komposisi campuran secara tepat, serta proses pencetakan dan produksi yang optimal secara signifikan meningkatkan kualitas akhir produk. Komponen utama dalam pembuatan *Paving porous* meliputi semen Portland sebagai perekat, agregat halus dan agregat kasar sebagai bahan pengisi, serta air sebagai reagen dalam proses hidrasi semen. Pengelolaan komposisi dan metode produksi yang tepat menjadi kunci utama dalam menghasilkan *Paving porous* yang memiliki kekuatan dan porositas sesuai standar yang diinginkan.

2.5.1 Semen Portland (PC)

Semen Portland, yang dikenal juga sebagai semen hidrolis, berperan sebagai bahan pengikat utama yang sering digunakan dalam konstruksi. Sebutan hidrolis menunjukkan kemampuannya bereaksi secara

kimiawi dan mengeras saat bersentuhan dengan air. Dari segi fungsi, semen bertindak sebagai perekat yang mengintegrasikan partikel agregat menjadi massa kompak dengan integritas struktural. Saat dicampur hanya dengan air, semen membentuk pasta; namun, apabila dikombinasikan dengan pasir dan air, hasilnya adalah mortar semen. Proses hidrasi pada campuran ini memicu reaksi kimia yang menghasilkan kalsium silikat hidrat serta kalsium hidroksida, yang secara substansial memperkuat kekuatan dan durabilitas beton secara keseluruhan. (Ibrahim,2021).

Semen Portland terdiri dari sejumlah komponen kimia utama yang berperan penting dalam sifat dan kinerjanya. Unsur kalsium oksida (CaO) yang diperoleh dari batu kapur merupakan bahan dasar utama, sedangkan silika dioksida (SiO_2) biasanya diperoleh dari lempung atau pasir silika. Selain itu, semen ini juga mengandung alumunium oksida (Al_2O_3) yang berperan dalam mempercepat proses pengerasan dan meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi. Selama proses pelarutan atau hidrasi, komponen-komponen tersebut saling berinteraksi melalui reaksi kimia yang kompleks, yang menjadi dasar dari kemampuan semen Portland untuk mengeras dan mengikat material lain dalam konstruksi. Adapun komposisi kimia dari semen Portland berdasarkan Lilis Widojoko (2010) adalah sebagai berikut.

Tabel 2. 4 Kandungan kimia semen Portland

Unsur kimia dalam semen	Persentase (%)
Kapur (CaO)	60-65
Silika (SiO_2)	17-25
Alumina (Al_2O_3)	3-8
Oxid Besi (Fe_2O_3)	0,5-6
Magnesium (MgO)	0,5-4
Sulfur (SO_3)	0,5-1
Soda/Potash ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)	0,5-1

(Sumber : Lilis Widojoko, 2010)

Berdasarkan Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia (PUBI) 1982, semen diklasifikasikan menjadi lima jenis sesuai dengan tujuan penggunaannya. Adapun kelima jenis semen tersebut dibedakan berdasarkan fungsi dan karakteristik pemakaiannya masing-masing.

1. Jenis I : merupakan jenis semen serbaguna yang diterapkan pada proyek konstruksi tanpa tuntutan spesifikasi khusus.

2. Jenis II : dirancang secara spesifik untuk struktur yang memerlukan resistensi sedang terhadap agresi sulfat, sambil menghasilkan panas hidrasi pada level moderat
3. Jenis III : diformulasikan untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan awal yang tinggi.
4. Jenis IV : ditujukan untuk pembangunan yang menuntut panas hidrasi rendah guna mengurangi risiko retak akibat panas yang berlebihan.
5. Jenis V : diterapkan pada situasi yang menuntut resistensi ekstrem terhadap serangan sulfat, ideal untuk kondisi lingkungan dengan agresivitas kimiawi tinggi.

2.5.2 Agregat Halus

Agregat halus merupakan butiran mineral yang keras dengan bentuk yang cenderung membulat dan tekstur yang tajam, serta memiliki sifat stabil. Ukuran partikel agregat halus biasanya berada dalam kisaran 0,07 hingga 5 mm sesuai dengan SNI 03-1750-1990. Dalam campuran *paving porous*, agregat halus berfungsi sebagai material pengisi yang mampu meningkatkan kekuatan struktur, mengurangi tingkat penyusutan, serta menekan kebutuhan penggunaan semen. Pasir tergolong sebagai agregat halus, yakni material yang mampu lolos melalui saringan nomor 8 tetapi tertahan pada saringan nomor 200. Proporsi dan kualitas agregat halus memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik maupun mutu *paving porous* yang dihasilkan. Idealnya, untuk memperoleh performa optimal, campuran agregat sebaiknya terdiri dari dua fraksi ukuran yaitu agregat halus dengan diameter butir hingga 4,5 mm dan agregat kasar dengan diameter butir lebih dari 4,5 mm. Pengelolaan ukuran dan kualitas agregat ini menjadi faktor kunci dalam menjamin mutu *Paving porous*. Persyaratan agregat halus berdasarkan SNI 03-1750-1990 meliputi beberapa ketentuan yang harus dipenuhi agar material dapat digunakan secara optimal dalam campuran konstruksi. Adapun persyaratan tersebut adalah sebagai berikut.

1. Agregat halus harus terdiri atas partikel-partikel yang keras dan bersudut tajam serta memiliki gradasi yang berkesinambungan. Selain itu, partikel agregat halus harus bersifat tahan lama dan tidak mudah pecah maupun hancur akibat pengaruh kondisi cuaca, seperti paparan sinar matahari dan hujan.
2. Susunan ukuran butir agregat halus harus memiliki nilai modulus kehalusan berkisar antara 1,50 hingga 3,80.

3. adar lumpur atau partikel dengan ukuran lebih kecil dari 70 mm dibatasi maksimum sebesar 5%
4. Penentuan kandungan zat organik dilakukan menggunakan larutan NaOH 3%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa warna sampel tidak boleh lebih gelap dibandingkan warna standar atau minimal memiliki tingkat warna yang sama dengan warna standar tersebut.
5. Tingkat kekerasan partikel agregat halus, apabila dibandingkan dengan partikel pasir pembanding yang berasal dari pasir kuarsa Bangka, harus memiliki nilai rasio yang tidak melebihi 2,20.

2.5.3 Agregat Kasar

Agregat kasar, yang umum disebut kerikil, terbentuk dari degradasi alami batuan atau melalui proses penghancuran batu secara industri. Dimensi partikelnya berkisar antara 4,76 mm hingga 150 mm (SNI 03-6828-2012). Agregat ini terdiri dari berbagai jenis, termasuk kerikil alami yang terbentuk melalui proses pelapukan dan erosi, serta batu pecah buatan yang diperoleh dari mesin pemecah batu.

Secara teoritis, karakteristik fisik dan mekanik agregat kasar memiliki pengaruh signifikan terhadap mutu akhir paving, termasuk kekuatan tekan, ketahanan terhadap benturan, serta stabilitas dimensinya. Faktor seperti tingkat kekerasan, kehalusan permukaan, dan kebersihan agregat menjadi penentu utama kualitas material tersebut. Selain itu, kandungan senyawa yang berpotensi merusak beton, seperti alkali, perlu diminimalkan untuk menjaga ketahanan struktur terhadap proses degradasi. Adapun ketentuan dari agregat kasar adalah sebagai berikut :

1. Agregat kasar wajib terdiri dari partikel-partikel yang tangguh dengan tingkat kepadatan tinggi atau minim porositas.
2. Penggunaan agregat kasar berbentuk butir pipih hanya diperbolehkan jika persentasenya tidak melampaui 20% dari massa total agregat secara keseluruhan.
3. Agregat kasar tidak diperbolehkan mengandung lumpur dengan kadar lebih dari 1% terhadap berat kering totalnya.
4. Agregat kasar harus bebas dari zat-zat yang berisiko merusak beton, termasuk senyawa alkali.
5. Kerikil yang diperoleh dari proses pemecahan batu boleh digunakan sebagai agregat kasar.
6. Agregat kasar diwajibkan menjalani uji kekerasan melalui alat Rudeloff dengan muatan pengujian mencapai 20 ton.

7. Persentase kelemahan saat diuji dengan goresan batang tembaga tidak boleh melebihi 5%.
8. Agregat kasar wajib memiliki nilai faktor kehalusan dalam kisaran 6 hingga 7,5.

2.5.4 Air

Air menjadi salah satu elemen bagian utama yang paling hemat biaya dalam produksi *paving porous*, berperan sebagai medium reaksi hidrasi semen serta pelumas antar-partikel agregat pada komposisi campuran. Komposisi kimiawi atau zat organik yang terkandung dalam air berpotensi memengaruhi kualitas akhir *paving porous* yang dihasilkan. Secara umum, air yang memenuhi kriteria untuk proses pembuatan beton adalah air yang aman untuk dikonsumsi (Meidiani, 2017). Namun, tidak seluruh jenis air memenuhi kriteria ini, sebab banyak di antaranya mengandung beragam zat yang berpotensi membahayakan kualitas campuran. Standar SK SNI S-04-1989-F menetapkan sejumlah persyaratan khusus terkait kualitas air yang diperbolehkan untuk digunakan sebagai bahan dalam pekerjaan konstruksi, yaitu sebagai berikut.:

1. Air yang digunakan harus dalam kondisi bersih.
2. Air tidak boleh mengandung lumpur, minyak, maupun material terapung lainnya yang dapat diamati secara visual.
3. Kandungan partikel tersuspensi di dalam air tidak boleh melebihi 2 gram per liter
4. Air harus terbebas dari garam-garam terlarut yang dapat merusak *Paving block*, termasuk asam, senyawa organik, maupun bahan sejenis lainnya, dengan batas maksimum 15 gram per liter. Kadar klorida (Cl) tidak diperkenankan melampaui 500 ppm, sedangkan kandungan sulfat dibatasi hingga 1000 ppm dalam bentuk SO_3
5. Jika dibandingkan dengan kuat tekan campuran maupun *Paving block* yang menggunakan air distilasi, penurunan kekuatan pada campuran atau *Paving block* yang memakai air hasil pengujian tidak boleh melebihi 10%.
6. Setiap jenis air yang diragukan kualitasnya wajib menjalani analisis kimia serta dievaluasi kelayakannya sesuai dengan tujuan penggunaannya.

7. Khusus untuk beton prategang, selain memenuhi ketentuan yang telah disebutkan sebelumnya, kadar klorida yang diperbolehkan tidak boleh melebihi 500 ppm.

2.6 Abu Ampas Tebu

Abu ampas tebu adalah residu yang dihasilkan dari pembakaran serat batang tebu pasca ekstraksi jus pada industri gula. Material ini berasal dari ampas tebu, yang biasanya menyumbang 24–40% dari massa total tebu yang diproses. Komposisi ampas tebu pra-pembakaran mencakup kadar air 48–52%, gula 2,5–6%, serta serat 44–48%. Selanjutnya, ampas tersebut dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler pada suhu 550–600°C, menghasilkan abu berpigmen abu-abu dengan partikel halus.. (Karimah & Wahyudi, 2016)

Dalam industri konstruksi, abu ampas tebu berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen pada pembuatan beton maupun paving block sebagai upaya pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Pemanfaatan limbah abu ampas tebu tersebut tidak hanya bertujuan untuk mengurangi penggunaan semen sebagai bahan pengikat utama, tetapi juga untuk meminimalkan dampak lingkungan akibat limbah hasil industri pengolahan tebu. Secara kimiawi, abu ampas tebu memiliki kandungan silika (SiO_2) yang relatif tinggi, di mana senyawa tersebut merupakan salah satu komponen utama penyusun semen Portland. Kandungan silika aktif pada abu ampas tebu berperan penting dalam terjadinya reaksi pozzolan, yaitu reaksi antara silika amorf dengan kalsium hidroksida [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] yang dihasilkan selama proses hidrasi semen. Reaksi tersebut menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanis, kepadatan struktur mikro, serta ketahanan material konstruksi terhadap pengaruh lingkungan.

Pada penelitian ini abu ampas tebu digunakan sebagai bahan campuran dalam pembuatan *Paving porous*. Abu ampas tebu diperoleh dari Pabrik Gula Krembung, yang berlokasi di Krembung timur, Kecamatan Krembung, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur.



Gambar 2. 3 Abu ampas tebu
(Sumber : Dokumentasi Peneliti , 2025)

Komposisi kimia abu ampas tebu tersusun atas berbagai senyawa, yang dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Komposisi kimia abu ampas tebu

Senyawa Kimia	Presentase(%)
SiO ₂	70,63
Fe ₂ O ₃	3,96
Al ₂ O ₃	3,48
K ₂ O	1,75
TiO ₂	1,55
P ₂ O ₅	0,927
CaO	0,728
MgO	0,706
SO ₃	0,235
CL	0,134
ZrO ₂	0,0906
MnO	0,0627
Cr ₂ O ₃	0,0424
Na ₂ O	0,0308
V ₂ O ₅	0,0141

(Sumber : Laboratorium Pusat Survei Geologi, 2022)

Tabel 2. 5 Komposisi kimia abu ampas tebu (lanjutan)

ZnO	0,0051
CuO	0,0028
NiO	0,0027

(Sumber : Laboratorium Pusat Survei Geologi, 2022)

Tabel 2. 6 Kandungan kimia semen portland

Unsur kimia dalam semen	Persentase (%)
Kapur (CaO)	60-65
Silika (SiO ₂)	17-25
Alumina (Al ₂ O ₃)	3-8
Oxid Besi (Fe ₂ O ₃)	0,5-6
Magnesium (MgO)	0,5-4
Sulfur (SO ₃)	0,5-1
Soda/Potash (Na ₂ O + K ₂ O)	0,5-1

(Sumber : Lilis Widodo, 2010)

Abu ampas tebu memiliki bentuk butiran halus dengan kandungan SiO₂ yang cukup tinggi, yakni sekitar 71%. Tingginya kadar silika tersebut menjadikan material ini berpotensi digunakan sebagai substitusi sebagian semen dalam proses pembuatan *Paving porous*.

Tabel 2. 7 Kandungan silika campuran pengganti semen

Bahan	Silika
Abu sekam padi	80,4%
Abu ampas tebu	70,63%
Abu daun bambu	62%
Abu terbang	52%

(Sumber : Laboratorium Pusat Survei Geologi, 2022)

Tabel 2.7 memuat bahan-bahan yang dapat digunakan sebagai pengganti semen. Berdasarkan tabel diatas, kandungan silika tertinggi terdapat pada abu sekam padi kemudian disusul dengan abu ampas tebu. Alasan peneliti memilih abu ampas tebu pada penelitian ini dikarenakan di lokasi penelitian *supply* abu ampas tebu lebih mudah dikumpulkan karena pembakaran teratur setiap minggunya di pabrik gula Krembung.

2.7 Uji kuat Tekan

Uji kuat tekan merupakan metode pengujian standar yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan suatu material dalam menahan gaya tekan hingga mencapai titik kerusakan. Pengujian ini dilakukan setelah *Paving porous* melalui proses *curing* alami (pengeringan dengan diangin-anginkan) selama 28 hari. Tahapan pengujian meliputi pengambilan sampel *Paving porous* dari setiap variasi campuran yang telah disiapkan, kemudian memberikan pembebanan menggunakan *compression strength machine* hingga sampel mengalami kerusakan. Selanjutnya, data hasil pengujian diolah melalui perhitungan dengan rumus sebagai berikut (SNI-03-06-1996).

$$\text{Kuat Tekan} = \frac{F}{A}, \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan :

F = beban tekan (N)

A = luas bidang tekan (m^2)

2.8 Uji Daya Serap Air

Pengujian daya serap air pada *Paving porous* dilakukan setelah masa perawatan selama 28 hari. Tujuan pengujian ini adalah untuk menentukan jumlah air yang dapat diserap oleh *Paving porous*, yang dilakukan melalui proses perendaman dalam air bersih selama 24 jam, kemudian dilakukan penimbangan untuk memperoleh berat dalam kondisi jenuh. Setelah itu, sampel dikeringkan di dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam dan ditimbang kembali untuk mendapatkan berat keringnya. Rumus untuk menghitung daya serap air adalah sebagai berikut (SNI-03-06-1996).

$$\text{Penyerapan air} = \frac{A-B}{B} \times 100\%, \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

A = berat paving basah (gr)

B = berat paving kering (gr)

2.9 Permeabilitas

Permeabilitas merupakan kemampuan *Paving porous* untuk menyerap atau meloloskan air melalui rongga-rongga yang terdapat di dalam strukturnya. Pengujian ini dilakukan untuk menilai salah satu fungsi utama

Paving porous, yaitu kemampuannya dalam mengurangi atau mencegah terjadinya genangan pada permukaan perkerasan jalan.

Dalam penelitian ini nilai permeabilitas didapatkan melalui pengujian dengan metode *falling head*. Secara prinsip, metode *falling head* didasarkan pada pengamatan perubahan tinggi muka air (*head*) terhadap waktu saat air mengalir melalui spesimen. Berbeda dengan *metode constant head* yang mempertahankan tinggi tekanan tetap, metode ini memanfaatkan penurunan *head* sebagai variabel utama untuk menghitung laju aliran. Pengujian dilakukan dengan mengalirkan air melalui sampel yang telah jenuh, kemudian mencatat penurunan tinggi kolom air pada interval waktu tertentu. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung koefisien permeabilitas dengan pendekatan matematis yang mempertimbangkan dimensi spesimen, luas penampang aliran, serta perubahan *head* terhadap waktu. Nilai permeabilitas didapatkan dengan cara rumus 2.3 sebagai berikut (ACI 522R-10).

$$k = \frac{aL}{At} \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right), \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

- k = koefisien permeabilitas (m/detik)
- a = luas penampang alat uji (m²)
- L = ketebalan benda uji (m)
- A = luas penampang benda uji (m²)
- h₁ = ketinggian awal air (m)
- h₂ = ketinggian akhir air (m)
- t = waktu aliran (detik)

2.10 Pengujian Agregat

Pengujian agregat dilakukan untuk mengidentifikasi berbagai karakteristik material, termasuk berat jenis, daya serap, tingkat kelekatan, keausan, gradasi, serta kebersihannya dari kandungan lumpur. Prosedur ini dimaksudkan untuk menjamin bahwa agregat yang dipakai telah sesuai dengan standar teknis yang berlaku.

2.10.1 Pengujian Analisa Saringan

Metode ini secara fundamental diterapkan untuk menetapkan gradasi agregat. Data hasilnya biasanya digunakan guna mengevaluasi kecocokan distribusi dimensi partikel terhadap kriteria spesifik, sekaligus menyediakan data esensial bagi pengendalian proses manufaktur agregat atau komposisi campuran berbasis agregat (SNI 03-1968-1990). Nilai

persentase analisa saringan bisa didapatkan dengan persamaan 2.4 dan 2.5 berikut.

$$\text{Persentase Tertahan} = \frac{\text{Berat Kumulatif tertahan}}{\text{Berat Total Semula}}, \dots \quad (2.4)$$

$$\text{Persentase Lolos} = 100\% - \text{Persentase Tertahan}, \dots \quad (2.5)$$

2.10.2 Berat Jenis Agregat dan Penyerapan Air

Berat jenis agregat didefinisikan sebagai rasio massa agregat terhadap volume yang ditepatinya. Indikator ini merupakan sifat fisik krusial karena secara langsung memengaruhi kualitas dan kestabilan komposisi *paving porous*. Penyerapan air agregat merepresentasikan kapasitas agregat untuk menyerap air ke dalam pori-pori internalnya. Nilai penyerapan ini diukur sebagai persentase massa air yang diserap relatif terhadap massa agregat dalam keadaan kering oven. Parameter tersebut mencerminkan volume air yang dapat menembus pori-pori agregat, sehingga berguna untuk mengukur tingkat porositas serta kualitas agregat secara keseluruhan. Prosedur pengujian guna menetapkan berat jenis dan tingkat penyerapan air diatur dalam SNI 1970:2008 untuk agregat halus, sedangkan bagi agregat kasar mengikuti SNI 1969:2008 (2008). Penentuan berat jenis agregat mencakup beberapa kategori, dengan rumus perhitungan berat jenis serta penyerapan air pada agregat sebagai berikut:

1. Berat Jenis Bulk (*Bulk Specific Gravity*) yang sering disebut juga berat jenis curah kering (S_d), merujuk pada rasio massa agregat dalam kondisi kering terhadap total volume agregat.. Nilai berat jenis bulk pada agregat kasar maupun halus diperoleh melalui rumus 2.6 dan 2.7 berikut.

- Berat jenis bulk agregat kasar (berat jenis kering)

$$\frac{A}{(B-C)}, \dots \quad (2.6)$$

- Berat jenis bulk agregat halus

$$\frac{A}{(D+B-Dt)}, \dots \quad (2.7)$$

2. Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (*Saturated Surface Dry Specific Gravity*) atau yang sering disebut berat jenis curah (S_s), melibatkan pengukuran berat jenis agregat berdasarkan beratnya dalam keadaan jenuh kering permukaan, di mana air yang terserap ke dalam pori-pori agregat juga diperhitungkan. Nilai dapat diperoleh melalui persamaan berikut 2.8 dan 2.9.

- Berat jenis kering permukaan agregat kasar

$$\frac{B}{(B-C)}, \dots\dots\dots (2.8)$$

- Berat jenis kering permukaan agregat halus

$$\frac{B}{(D+B-Dt)}, \dots\dots\dots (2.9)$$

3. Berat Jenis Semu (*Apparent Specific Gravity*) merujuk pada rasio berat dari volume satuan bagian agregat yang tidak *permeabel* pada suhu tertentu, dibandingkan dengan berat air suling bebas gelembung di udara dalam volume serupa pada suhu yang sama. Nilai tersebut dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.10 dan 2.11 berikut.

- Berat jenis semu agregat halus

$$\frac{A}{(D+A-Dt)}, \dots\dots\dots (2.10)$$

- Berat jenis semu agregat kasar

$$\frac{A}{(A-C)}, \dots\dots\dots (2.11)$$

4. Penyerapan air merujuk pada peningkatan berat agregat yang disebabkan oleh air yang meresap ke dalam rongga porinya, tanpa menghitung air yang menempel di permukaan luar partikel tersebut. Nilai ini diungkapkan dalam bentuk persentase terhadap berat kering agregat; agregat dianggap benar-benar kering setelah dipanaskan pada suhu $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ selama periode waktu yang cukup untuk menghilangkan semua kadar air yang terkandung di dalamnya. Nilai tersebut dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.12 dan 2.13 berikut.

- Penyerapan agregat halus

$$\frac{(B-A)}{A} \times 100\%, \dots\dots\dots (2.12)$$

- Penyerapan agregat kasar

$$\frac{(B-A)}{A} \times 100\%, \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan :

- A = berat kering oven (gr)
 B = berat kering permukaan jenuh / SSD (gr)
 C = berat didalam air (gr)
 D = berat piknometer + air (gr)
 Dt = berat piknometer + agregat + air (gr)

2.10.3 Kadar Lumpur Agregat

Kadar lumpur pada agregat didefinisikan sebagai persentase partikel halus yang lolos saringan 0,075 mm (No. 200) dan tersuspensi di dalam agregat. Material halus semacam ini biasanya berbentuk lempung, tanah liat, atau debu yang melekat pada permukaan agregat, sehingga mengacaukan ikatan antara pasta semen dan agregat.

Berdasarkan SNI 03-4142-1996 (1996) serta SK SNI S-04-1989-F, ambang batas maksimum kadar lumpur yang ditoleransi adalah 5% bagi agregat halus dan 1% untuk agregat kasar. Pengujian melibatkan pengambilan sampel agregat secara acak, pengocokan atau pencucian, pengeringan, dan penimbangan. Untuk mendapatkan nilai kadar lumpur dapat menggunakan rumus persamaan 2.14 berikut.

$$Kadar\ Lumpur = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100\% , \dots\dots\dots (2.14)$$

Keterangan :

W_1 = berat agregat sebelum dicuci (gr)

W_2 = berat agregat bersih kondisi kering (gr)

2.10.4 Keausan Agregat

Metode uji keausan agregat yang lazim adalah melalui mesin abrasi Los Angeles. Prosedur ini mengukur persentase massa agregat yang terkikis (lolos saringan berukuran spesifik) relatif terhadap massa awal, dengan hasil dinyatakan sebagai nilai indeks keausan dalam persen. Semakin kecil indeks keausan, semakin superior kualitas agregat untuk aplikasi pada konstruksi jalan raya. Pada pengujian keausan agregat mengacu pada peraturan SNI 2417:2008. Nilai tersebut bisa didapatkan melalui rumus persamaan 2.15 berikut.

$$\%Keausan = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100 , \dots\dots\dots (2.15)$$

Keterangan :

$\%Aus$ = nilai persentase keausan agregat (%)

W_1 = berat agregat sebelum pengujian (gr)

W_2 = berat agregat tertahan saringan No.12 setelah pengujian (gr)

2.10.5 Berat Volume agregate

Berat volume agregat rasio antara berat agregat dalam kondisi kering terhadap volume keseluruhan yang ditempatinya, yang mencakup volume partikel padat, volume butir, serta ruang kosong antar-butir yang tidak terisi oleh material padat. Pengujian ini dilaksanakan mengikuti

standar ASTM C29/C29M-97 dengan tujuan utama untuk memperoleh nilai berat volume agregat baik dalam kondisi padat/kompak maupun lepas/gembur, serta menghitung besarnya rongga udara yang terdapat dalam agregat halus, kasar, atau campuran, sehingga dapat menyediakan data yang akurat untuk perhitungan komposisi campuran paving apabila material diukur berdasarkan berat. Dalam pelaksanaan pengujian, agregat berukuran $\leq 37,5$ mm dipadatkan dengan cara ditumbuk menggunakan tongkat penusuk sebanyak 25 kali pada setiap sepertiga bagian volume penakar, yang menghasilkan berat isi padat lebih tinggi dibandingkan berat isi lepas karena adanya pengurangan ruang kosong, dan berdasarkan hasil percobaan, agregat halus menunjukkan berat isi padat yang lebih besar daripada agregat kasar disebabkan oleh ukuran partikelnya yang lebih kecil sehingga ruang kosong lebih sedikit dan kepadatan partikel dalam satuan volume lebih tinggi, sehingga hasil pengujian berat volume agregat sangat diperlukan untuk menentukan proporsi agregat dalam campuran paving, menghitung komposisi campuran paving dengan tepat, serta mengetahui nilai rongga udara dalam satuan volume agregat.

2.11 Pengujian Semen

Pengujian semen dilakukan untuk mengukur karakteristik dan kualitas semen, terutama waktu pengikatan awal dan akhir atau waktu mengeras. Tujuan uji ini adalah untuk mengetahui seberapa baik semen dapat mengalami proses hidrasi dari saat pertama kali bercampur dengan air hingga mencapai kondisi mengeras yang ideal. Waktu pengikatan awal menunjukkan batas waktu di mana semen mulai kehilangan sifat plastisnya, sedangkan waktu pengikatan akhir menunjukkan batas waktu di mana semen mulai kehilangan sifat plastisnya.

Waktu mengikat semen adalah interval waktu sejak air dicampurkan dengan semen hingga pasta semen mulai kehilangan sifat plastisnya dan berangsur mengeras. Pengujian ini bertujuan mengetahui kecepatan reaksi hidrasi semen dalam kondisi standar Berdasarkan SNI 03-6827-2002 mengenai Metode Pengujian Waktu Ikat Semen Portland menggunakan Alat Vicat, waktu ikat diklasifikasikan menjadi dua fase: waktu ikat awal dan waktu ikat akhir. Waktu ikat awal mengindikasikan momen ketika pasta semen mulai kehilangan plastisitasnya, sementara waktu ikat akhir menandakan saat pasta sepenuhnya mengeras dan mampu menahan beban ringan tanpa deformasi. Waktu pengerasan semen

(hardening time) melanjutkan proses pengikatan tersebut, di mana pasta semen berevolusi menjadi massa padat melalui reaksi hidrasi yang berkelanjutan. Prinsip pengujian waktu ikat semen adalah dengan mengamati kedalaman penetrasi jarum Vicat ke dalam pasta semen pada waktu-waktu tertentu. Pasta semen disiapkan dengan kadar air yang sesuai dengan konsistensi normalnya. Pada waktu tertentu, jarum Vicat dijatuhkan secara vertikal ke permukaan pasta, dan kedalaman penetrasinya diukur. Bila penetrasi jarum 1 (untuk waktu ikat awal) tidak mencapai dasar pelat tetapi tidak lebih dari 4 mm, maka waktu tersebut ditetapkan sebagai waktu ikat awal. Sementara itu, untuk waktu ikat akhir, digunakan jarum cincin yang dianggap mencapai nilai ketika hanya meninggalkan bekas kecil pada permukaan tanpa penetrasi signifikan

2.12 Metode *Mix Design* ACI 522R

Paving porous sering kali menggunakan prinsip dasar yang sama dengan beton normal, tetapi dengan penekanan pada mengurangi jumlah agregat halus untuk menciptakan lebih banyak ruang kosong atau pori-pori. Dalam metode ACI, penyesuaian dilakukan pada campuran air-semen dan pemilihan agregat yang lebih kasar untuk menjaga tingkat permeabilitas yang tinggi (ACI 522R, 2010).

ACI 522R adalah panduan yang mengarah pada desain campuran beton ringan yang memanfaatkan perhitungan untuk menentukan rasio yang tepat antara semen, agregat, air, serta bahan pengikat dan bahan tambahan lainnya untuk mendapatkan kualitas beton yang diinginkan. Metode ini mengutamakan bahan baku yang lebih ringan, sering kali digunakan dalam konstruksi yang membutuhkan pengurangan beban pada struktur atau dalam proyek yang mengutamakan isolasi termal dan suara. Berikut merupakan langkah-langkah dalam perencanaan mix design dengan metode ACI 522R 10:

1. Pemilihan bahan baku
 - a. Agregat kasar: Agregat kasar yang digunakan dalam *paving porous* harus cukup besar dan memiliki permukaan kasar untuk meningkatkan ikatan antara agregat dan bahan pengikat. Ukuran agregat umumnya antara 9,5 mm hingga 25 mm. Agregat yang lebih besar cenderung memberikan lebih banyak pori.
 - b. Agregat halus: *paving porous* dapat menggunakan sedikit atau bahkan tanpa agregat halus, karena tujuannya adalah menciptakan lebih banyak ruang kosong untuk drainase. Penggunaan agregat halus yang

minimal membantu menghasilkan lebih banyak ruang kosong dalam campuran.

- c. Semen: Semen Portland biasa (*Ordinary Portland Cement*) adalah pilihan umum dalam campuran *paving porous*. Penggunaan bahan pengikat lainnya bisa meningkatkan daya tahan dan fleksibilitas beton.
- d. Air: Kandungan air yang digunakan dalam campuran *paving porous* harus dihitung dengan hati-hati. Menggunakan terlalu banyak air dapat menurunkan porositas, sedangkan terlalu sedikit air akan membuat campuran sulit dikerjakan.

2. Menentukan Rasio Air-Semen (w/cm)

Air dalam campuran *paving porous* berfungsi untuk menghidratkan semen, yang memungkinkan proses pengerasan dan pembentukan kekuatan dalam *paving porous*. Selain itu, air juga mempengaruhi kemampuan *paving porous* untuk mengalirkan air (drainase), yang merupakan sifat penting dari *paving porous*. Oleh karena itu, penting untuk menemukan keseimbangan yang tepat antara proses hidrasi semen dan menciptakan porositas yang cukup untuk mendukung fungsi drainase *paving porous*.

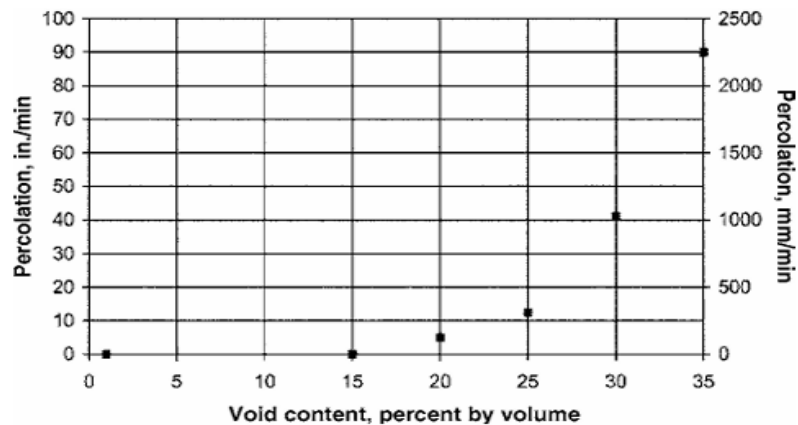
Rasio air-semen adalah perbandingan antara jumlah air yang digunakan dengan jumlah semen dalam campuran *paving porous*. ACI 522R-10 merekomendasikan bahwa rasio air-semen yang optimal untuk *paving porous* adalah 0,26 hingga 0,40. Berikut adalah alasan mengapa rentang rasio ini dipilih:

- a. Rasio Air-Semen 0,26 hingga 0,40:
 - 1) Ketahanan terhadap pembekuan lebih baik karena jumlah air yang lebih sedikit dalam campuran menghasilkan lebih sedikit rongga berisi air yang dapat membeku.
 - 2) Menghasilkan kekuatan tekan yang lebih tinggi, karena rasio semen yang lebih tinggi dengan air yang lebih sedikit akan memperkuat ikatan antar agregat.
 - 3) Namun, rasio ini dapat mengurangi porositas atau kemampuan drainase, sehingga perlu perhatian lebih dalam memilih agregat yang sesuai dan menjaga keseimbangan antara kekuatan dan permeabilitas.
- b. Rasio Air-Semen 0,26 hingga 0,40:
 - 1) Pada rasio ini, campuran *paving porous* lebih mudah dikerjakan dan dicampur, namun kekuatan tekan dapat sedikit menurun.

- 2) Porositas yang lebih tinggi dapat dicapai karena lebih banyak air dalam campuran, yang memungkinkan lebih banyak rongga udara terbentuk.
- 3) Drainase lebih baik karena lebih banyak ruang terbuka yang memungkinkan air mengalir melalui *paving porous*.

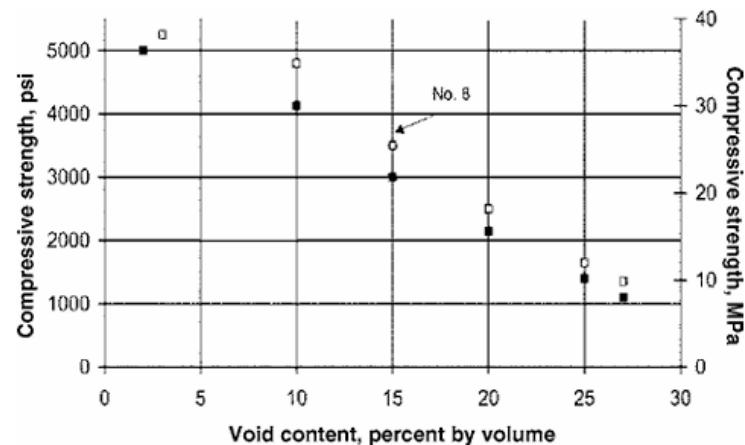
3. Menentukan Estimasi *Void Content*

Melakukan estimasi *void*. Tujuannya adalah menghitung jumlah pasta minimum yang cukup untuk melapisi agregat, tetapi tidak sampai menutup rongga. Untuk memastikan air dapat meresap melalui *paving porous*, kandungan rongga harus minimal 15%, sesuai ASTM C138/C138M. Jika kurang dari 15%.



Gambar 2. 4 Kandungan Rongga Minimum Perkolasi pada Pengujian NAA-NRMCA dan Metode Pengujian
(Sumber: ACI 522R 10)

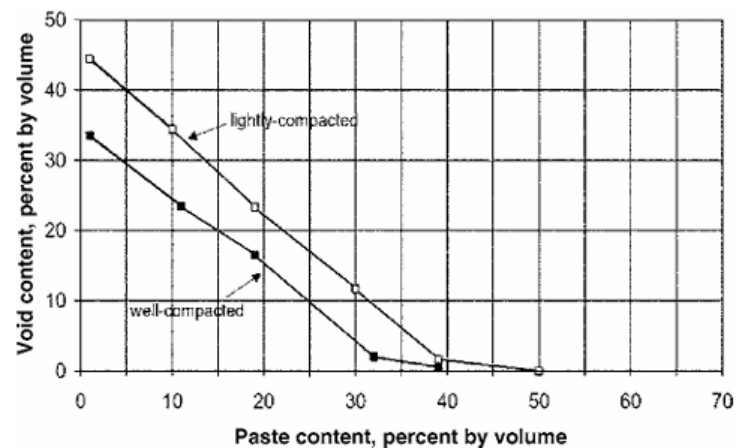
Rongga yang tidak saling terhubung sehingga perkolasi air tidak signifikan. Pada gambar 2.2 menunjukkan semakin besar kandungan rongga, laju perkolasi meningkat namun kuat tekan menurun. Sebaliknya, semakin sedikit rongga, laju perkolasi menurun dan kuat tekan meningkat. Kuat tekan beton porus juga dipengaruhi oleh kekuatan agregat, ikatan pasta, dan kekuatan pasta semen.



Gambar 2. 5 Hubungan Antara Kadar Rongga dan Kuat Tekan 28 Hari Untuk Ukuran Agregat No. 67 dan No. 8
(Sumber: ACI 522R 10)

4. Menentukan volume pasta, volume semen dan air

Volume pasta merupakan jumlah dari volume semen dan air yang diperlukan untuk mengikat agregat dalam campuran *paving porous*. Untuk menentukan volume pasta, Anda dapat menggunakan Gambar 2.6 yang menghubungkan volume pasta dengan konten void dalam campuran *paving porous*. Pada gambar ini, volume pasta dapat dibaca berdasarkan *persentase void* (ruang kosong).



Gambar 2. 6 Hubungan Kadar Pasta dan Rongga Untuk Penunjukan Agregat No. 8
(Sumber: ACI 522R 10)

Banyak semen dapat mengisi void dan mengurangi perkolasi air, sementara terlalu sedikit semen dapat menyebabkan campuran menjadi

rapuh dan tidak cukup terikat. Oleh karena itu, pengujian laboratorium atau percobaan percampuran sangat penting untuk mencapai keseimbangan yang diinginkan antara kekuatan dan perkolasi air. Antar-agregat. Volume pasta terdiri dari volume semen dan air, persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$\text{Volume Pasta (VP)} = V. \text{semen} + V. \text{air} \dots \dots \dots (2.26)$$

$$\text{Volume Pasta (VP)} = \frac{c}{(3,15 \times 1000 \text{ kg/m}^3)} + \frac{w}{1000 \text{ kg/m}^3}$$

Keterangan:

c = Berat semen (Kg/m³)

w = Berat air (Kg/m³)

3,15 = Berat jenis semen

1000 = Densitas air (Kg/m³)

Setelah volume pasta diketahui, berat semen (*cement content*) dan air dapat dihitung menggunakan rumus yang berbasis volume absolut:

Berat semen:

$$c = \left[\frac{VP}{0,315 + w/cm} \right] \times 1000 \text{ Kg/m}^3 \dots \dots \dots (2.37)$$

Keterangan:

c : Berat semen (Kg/m³)

w/cm : Rasio air-semen

3,15 : Berat jenis semen

1000 : Densitas air (Kg/m³)

Berat Air:

$$w = c \times \left(\frac{w}{cm} \right) \dots \dots \dots (2.48)$$

Keterangan:

w : Berat air

c : Berat semen

w/cm : rasio air terhadap semen

Jika ada agregat halus dalam campuran, volume pasta harus dikurangi sekitar 2% untuk setiap 10% agregat halus yang digunakan pada *paving porous* yang terkompaksi dengan baik, atau 1% untuk *paving porous* yang kurang terkompaksi. Hal ini dilakukan untuk mempertahankan persentase void yang sama.

5. Menentukan Volume Agregat dan Jumlah Agregat

Jumlah agregat kasar ditentukan menggunakan rasio b/bo, yaitu perbandingan volume agregat dalam paving terhadap volume agregat dalam keadaan padat. Nilai b/bo disesuaikan dengan kandungan agregat

halus, yang biasanya 0% (tanpa pasir), 10%, atau 20%, dan diperoleh dari Tabel berikut. Semakin tinggi kandungan pasir, semakin kecil nilai b/b_o dan semakin rendah porositas paving.

Tabel 2. 8 Nilai b/b_o efektif

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

(Sumber: ACI 522R 10)

Setelah diketahui nilai b/b_o dan volume beton target (misal 1 m³), berat agregat dapat dihitung dari:

$$\text{Berat Agregat (Kg)} = \text{Volume Agregat} \times \text{Berat Jenis} \times b/b_o \dots\dots (2.59)$$

Volume agregat dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$V. \text{Agregat} = \frac{\text{Berat}_{SSD}}{\text{Berat Jenis Agregat} \times \text{Densitas Air}} \dots\dots\dots (2.20)$$

Tabel 2. 9 Kisaran Proporsi Material pada *paving porous*

	Proporsi (Kg/m ³)
Bahan Semen	270 – 415
Agregat	1190 – 1480
± Rasio w/cm	0,27 - 0,34
Rasio Agregat : Semen	4 - 4,5:1
Rasio Agregat Halus	0 - 1:1

(Sumber: ACI 522R 10)

6. Menentukan berat substitusi semen

Jumlah Substitusi semen sudah di tentukan dengan variasi 0%, 4%, 8%, dan 12%, dari jumlah semen yang di gunakan. Setelah mengetahui banyaknya substitusi semen, untuk menentukan berat yang di butuhkan dapat di hitung dengan rumus berikut.

$$Bs = Ws \times \left(\frac{Sm}{Sb}\right) \dots\dots\dots (2.21)$$

Keterangan :

Bs : Berat bahan substitusi semen

Ws : Berat total semen yang di gunakan

Sm : Banyaknya substitusi semen yang di gunakan

Sb : Satuan substitusi semen yang di gunakan (%)