

POTENSI LIMBAH BIOMASSA SAWIT SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT DAN SEMEN PADA BETON BERPORI

Muhammad Arif¹, Herni Suryani²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat

e-mail: *muh.arif.0117@gmail.com

Abstrak

Beton

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pemanfaatan limbah cangkang sawit dan abu cangkang sawit sebagai material inovatif dalam pembuatan beton berpori ramah lingkungan. Campuran beton divariasikan dengan penggantian sebagian agregat kasar oleh cangkang sawit sebesar 0%, 25%, dan 50%, serta penggantian sebagian semen oleh abu cangkang sawit sebesar 10%. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kuat tekan, kuat tarik belah, densitas, total void, permeabilitas, dan kemampuan mendukung pertumbuhan rumput. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh variasi beton berpori tidak memenuhi standar kuat tekan minimum berdasarkan SNI 03-0691-1990. Penambahan cangkang sawit meningkatkan nilai permeabilitas dan total void, namun menurunkan nilai kuat tekan, kuat tarik belah, dan densitas. Pertumbuhan rumput lebih baik pada campuran yang mengandung cangkang sawit, menunjukkan potensi positif dalam aspek ekologis. Secara keseluruhan, pemanfaatan cangkang sawit dan abu cangkang sawit berpotensi digunakan dalam beton berpori untuk aplikasi non-struktural yang membutuhkan kinerja drainase dan keberlanjutan lingkungan, namun tidak direkomendasikan untuk penggunaan struktural karena rendahnya kekuatan mekanik yang dihasilkan.

Kata kunci : beton berpori, cangkang sawit, abu cangkang sawit, beton ramah lingkungan, permeabilitas

Abstract

Utilization of Palm Biomass Waste as Aggregate and Cement Substitute in Pervious Concrete. This study aims to evaluate the utilization of palm shell waste and palm shell ash as innovative materials in the production of environmentally friendly pervious concrete. The concrete mixtures were varied by replacing coarse aggregate with palm shell at 0%, 25%, and 50%, and partially replacing cement with palm shell ash at 10%. Tests were conducted to assess compressive strength, splitting tensile strength, density, total voids, permeability, and the ability to support grass growth. The results indicate that all pervious concrete variations did not meet the minimum compressive strength standard based on SNI 03-0691-1990. The addition of palm shell increased permeability and total void content, but decreased compressive strength, tensile strength, and density. Grass growth was more favorable in mixtures containing palm shell, indicating a positive ecological potential. Overall, the use of palm shell and palm shell ash shows potential for non-structural applications of pervious concrete where drainage performance and environmental sustainability are prioritized. However, it is not recommended for structural use due to the low mechanical strength obtained.

Keywords : pervious concrete, palm shell, palm shell ash, eco-friendly concrete, permeability

I. PENDAHULUAN

Beton berpori merupakan salah satu jenis beton ramah lingkungan yang dirancang untuk meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah, sehingga dapat mengurangi limpasan permukaan dan mendukung pengisian ulang

air tanah. Beton ini banyak diterapkan pada konstruksi jalan, trotoar, area parkir, serta jalur pejalan kaki karena memiliki permeabilitas yang tinggi dan sifat termal yang mendukung kenyamanan lingkungan. Beton berpori memberikan solusi teknis dan ekologis, terutama di wilayah perkotaan yang menghadapi

masalah limpasan air berlebih akibat tingginya permukaan kedap air. Meski demikian, keterbatasan utama dari beton berpori adalah rendahnya kekuatan mekanik yang dihasilkan dibandingkan beton konvensional, yang dapat membatasi aplikasinya pada struktur yang membutuhkan ketahanan beban tinggi (Patah & Dasar, 2023).

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, material konstruksi yang ramah lingkungan menjadi perhatian utama bagi para peneliti dan praktisi teknik sipil. Beton ramah lingkungan adalah beton yang diproduksi dengan meminimalkan konsumsi energi alam serta menurunkan emisi karbon dioksida (CO_2) selama proses produksinya. Hal ini menjadi penting karena bahan utama dalam beton, yaitu semen, merupakan sumber emisi CO_2 yang signifikan akibat proses kalsinasi batu kapur. Data menunjukkan bahwa produksi satu ton semen dapat melepaskan sekitar satu ton emisi CO_2 ke atmosfer. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi penggunaan semen melalui inovasi material pengganti menjadi langkah strategis dalam mendukung pembangunan berkelanjutan (Simanjuntak et al., 2020).

Salah satu pendekatan yang terus dikembangkan adalah pemanfaatan limbah industri dan pertanian sebagai material pengganti dalam campuran beton. Limbah cangkang sawit dan abu cangkang sawit merupakan dua jenis limbah biomassa dari industri kelapa sawit yang ketersediaannya sangat melimpah, khususnya di negara-negara penghasil kelapa sawit seperti Indonesia. Pemanfaatan limbah ini tidak hanya memberikan solusi terhadap permasalahan lingkungan akibat penumpukan limbah, tetapi juga membuka peluang inovasi dalam pengembangan material konstruksi alternatif yang ekonomis dan berkelanjutan.

Cangkang kelapa sawit, yang merupakan bagian terkeras dari buah kelapa sawit, memiliki tekstur dan kekuatan yang menyerupai agregat kasar seperti kerikil, sehingga berpotensi digunakan sebagai substitusi agregat kasar dalam campuran beton. Struktur kerasnya yang berfungsi sebagai pelindung inti buah menjadikan cangkang ini secara fisik memenuhi karakteristik agregat kasar. Pemanfaatannya dalam beton tidak hanya bertujuan mengurangi penggunaan material alam, tetapi juga mengoptimalkan limbah padat yang selama ini kurang dimanfaatkan secara efektif (Butarbutar et al., 2023). Di sisi lain, abu cangkang sawit merupakan hasil samping dari proses pembakaran cangkang sawit pada suhu tinggi. Abu ini diketahui mengandung senyawa kimia seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan

kalsium oksida (CaO), yang menunjukkan sifat pozzolanik. Sifat ini membuat abu cangkang sawit dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam pasta semen untuk membentuk senyawa tambahan yang berkontribusi pada kekuatan beton. Dengan demikian, abu cangkang sawit memiliki potensi sebagai material substitusi sebagian semen, yang secara langsung dapat membantu menurunkan jejak karbon dalam produksi beton (Manaf et al., 2023; Patah et al., 2025; Dasar et al., 2025; Dasar et al., 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi sifat mekanik beton berpori yang dibuat dengan memanfaatkan cangkang sawit sebagai substitusi sebagian agregat kasar sebesar 25% dan 50%, serta abu cangkang sawit sebagai substitusi sebagian semen sebesar 10%. Seluruh proses pembuatan dan perawatan beton dilakukan menggunakan air tawar guna menjaga konsistensi lingkungan pengujian. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan beton berpori yang tidak hanya memiliki performa teknis yang memadai, tetapi juga ramah lingkungan dan berbasis pada pemanfaatan limbah lokal.

II. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Bahan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Terpadu Universitas Sulawesi Barat. Bahan utama yang digunakan dalam pembuatan beton berpori terdiri atas semen Portland Komposit (PCC), kerikil alami, cangkang sawit, abu cangkang sawit, dan air tawar.

Cangkang sawit dan abu cangkang sawit yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT. Surya Lestari II, yang berlokasi di Kabupaten Mamuju Tengah, Provinsi Sulawesi Barat. Sementara itu, agregat kasar berupa kerikil diperoleh dari CV. Anato di Kabupaten Pinrang, Provinsi Sulawesi Selatan.

B. Desain Benda Uji dan Komposisi Campuran

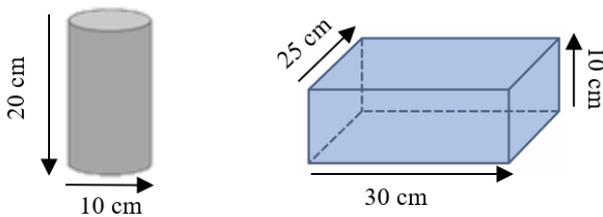
Benda uji dalam penelitian ini dibuat dalam dua jenis bentuk, yaitu silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm, serta pelat berdimensi 30 cm \times 25 cm \times 10 cm. Benda uji berbentuk silinder digunakan untuk pengujian kuat tekan, kuat belah, densitas, dan total void. Sementara itu, benda uji berbentuk pelat digunakan untuk pengujian permeabilitas dan pertumbuhan rumput sebagai indikator kemampuan ekologis beton berpori.

Variasi campuran beton berpori dibedakan berdasarkan persentase penggunaan cangkang sawit sebagai pengganti sebagian agregat kasar (kerikil), yaitu sebesar 0% (kontrol), 25%, dan 50%. Selain itu, abu cangkang sawit digunakan secara konsisten sebesar 10% sebagai substitusi sebagian semen pada seluruh variasi campuran.

Gambar 1 memperlihatkan dimensi benda uji yang digunakan dalam penelitian ini. Adapun jumlah benda uji yang digunakan untuk setiap variasi campuran dan jenis pengujian disajikan pada Tabel 1.

Proses pembuatan benda uji dilakukan melalui beberapa tahapan utama, yaitu pencampuran material, pencetakan ke dalam cetakan sesuai dimensi yang telah ditentukan, perawatan (curing), dan pengujian mekanik serta ekologis. Seluruh tahapan tersebut dilaksanakan sesuai standar prosedur yang berlaku untuk memastikan hasil yang konsisten dan representatif.

Secara umum, proses tersebut dapat dilihat secara sistematis pada Gambar 2.



Gambar 1. Bentuk dan Ukuran Benda Uji Beton Berpori



Gambar 2. Proses pembuatan, pencetakan, dan perawatan benda uji dengan air tawar.
C. Pengujian

Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm, masing-masing pada umur 7 dan 28 hari setelah perawatan (curing). Tujuan pengujian ini adalah untuk

mengevaluasi kekuatan struktural beton berpori pada berbagai variasi campuran.

Pengujian ini mengacu pada metode standar SNI 1974-2011, di mana kuat tekan beton (σ) dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima benda uji saat pengujian (P) terhadap luas penampang melintang benda uji (A). Adapun rumus perhitungannya menggunakan Persamaan (1).

$$F_c = P/A \quad (1)$$

Tabel 1. Jumlah Benda Uji Per Variasi Campuran

Variasi	Uji Kuat Tekan		Permeabilitas	Total Void	Densitas	Kuat Belah	Pertumbuhan Rumput
	7 Hari	28 Hari					
	Silinder						Plat
P10CS 0-TP	3	3	3	3	3	3	1
P10CS 25-TP	3	3	3	3	3	3	1
P10CS 50-TP	3	3	3	3	3	3	1

Keterangan :

P10 = Pofa 10%

CS 0,25,50 = Cangkang Sawit 0%,25%,50%

TP = Tanpa Perlakuan atau Tanpa proses penyaringan

Tabel 2. Mix Design Benda Uji

Variasi	Berat (Kg)					FAS (%)
	Air	Semen	POFA	Kerikil	Cangkang Sawit	
P10CS0-TP	3,600	9,257	1,029	33,789	0	35
P10CS25-TP	3,600	9,257	1,029	9,519	9,519	35
P10CS50-TP	3,600	9,257	1,029	19,038	19,038	35

Permeabilitas

Pengujian permeabilitas dilakukan pada umur 28 hari untuk menilai kemampuan beton berpori dalam mengalirkan air melalui sistem pori-porinya. Permeabilitas merupakan salah satu parameter utama dalam menilai kinerja beton berpori sebagai material ramah lingkungan, khususnya dalam konteks pengendalian limpasan air permukaan dan konservasi air tanah.

Pengujian ini mengacu pada standar ASTM C1701, yang dirancang khusus untuk beton berpori. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui kecepatan aliran air menembus beton berpori dalam satuan sentimeter

per detik (cm/s). Rumus yang digunakan dalam pengujian permeabilitas menggunakan Persamaan (2).

$$I = \frac{KM}{D^2 t} \quad (2)$$

Dimana :

I = Laju infiltrasi (cm/s)

D = Diameter benda uji (mm)

t = waktu yang dibutuhkan untuk meloloskan air (s)

K = Konstanta dengan nilai 4,584,666,000

((mm²detik)/(kg.jam))

M = Massa jenis air (g/cm³)

Total Void

Pengujian total void dilakukan pada umur 28 hari untuk menentukan persentase rongga atau pori yang terdapat dalam volume beton berpori. Total void merupakan parameter penting dalam menilai kualitas beton berpori karena berpengaruh langsung terhadap sifat mekanik maupun hidrolis beton, seperti kekuatan tekan dan permeabilitas. Semakin tinggi volume pori dalam beton, maka nilai total void juga akan meningkat, yang umumnya berdampak pada penurunan kekuatan mekanik beton. Metode pengujian total void mengacu pada standar ASTM C642-90, yang digunakan untuk menentukan densitas, penyerapan air, dan porositas beton. Berdasarkan standar tersebut, total void dihitung menggunakan persamaan (3).

$$n (\%) = \frac{C-A}{C-D} \times 100 \quad (3)$$

Dimana :

n = Total void benda uji (%)

A = Berat kering oven benda uji (kg)

C = Berat kondisi SSD (kg)

D = Berat dalam air (kg)

Densitas

Pengujian densitas dilakukan pada umur 28 hari untuk menentukan berat jenis beton berpori, yang merupakan rasio antara massa beton terhadap volumenya. Densitas merupakan salah satu parameter penting dalam menilai kualitas dan karakteristik beton, terutama dalam kaitannya dengan kekuatan dan daya tahan material. Pengujian ini dilakukan dengan mengacu pada standar SNI 1973:2016 dan ASTM C642, yang merupakan metode standar untuk mengukur densitas dan penyerapan air pada beton. Densitas beton berpori dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$D = \frac{Wd}{Vs} \quad (4)$$

Dimana :

D = Densitas (g/cm³)

Wd = Berat benda uji (g)

Vs = Volume silinder (cm³)

Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada umur 28 hari untuk mengetahui kekuatan tarik tidak langsung beton berpori. Kuat tarik belah merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kemampuan beton menahan gaya tarik yang bekerja secara transversal terhadap sumbu benda uji. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm, diletakkan secara horizontal sejajar dengan permukaan meja mesin uji tekan. Pembebanan dilakukan secara diametral hingga benda uji mengalami kerusakan. Pengujian ini dilakukan berdasarkan metode standar SNI 2491:2014. Persamaan yang digunakan untuk menghitung kuat tarik belah beton berpori adalah Persamaan (5).

$$f'_{ct} = \frac{2.P'}{\pi.h.d} \quad (5)$$

Dimana :

f'ct = Kuat tarik belah (Mpa)

P' = beban uji maksimum (beban belah/hancur) (Kn)

H = Panjang benda uji (mm)

D = diameter benda uji (mm)

Pertumbuhan Rumput Plat Beton Berpori

Pengujian pertumbuhan rumput dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana beton berpori dapat mendukung pertumbuhan vegetasi, khususnya rumput, dengan memanfaatkan kemampuannya dalam menyerap dan menyalurkan air ke lapisan tanah di bawahnya. Beton berpori memiliki sistem pori yang memungkinkan infiltrasi air, berbeda dengan beton konvensional yang bersifat kedap air dan menghambat penetrasi air, oksigen, serta nutrisi yang dibutuhkan oleh tanaman.

Uji ini dilakukan menggunakan benda uji berbentuk pelat berukuran 30 cm × 25 cm × 10 cm yang telah direndam dan ditempatkan di lingkungan terbuka. Rumput ditanam langsung di atas permukaan beton berpori, kemudian diamati selama periode tertentu untuk mengevaluasi tingkat pertumbuhan dan persebaran vegetasi. Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, luas sebaran rumput, dan tingkat

kelembaban beton.

Pengujian ini mengacu pada metode yang diadaptasi dari studi oleh Horiguchi, Itaru, Yoichi Mimura, dan Paulo J. M. Monteiro (2021). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa keberadaan pori-pori dalam struktur beton berpengaruh langsung terhadap efektivitas infiltrasi air dan keberlanjutan pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, pengujian pertumbuhan rumput ini menjadi indikator penting dalam menilai kontribusi ekologis dari penggunaan beton berpori berbahan limbah biomassa seperti cangkang dan abu cangkang sawit.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

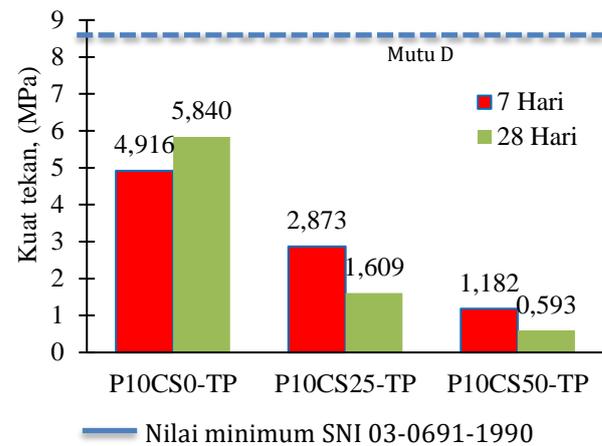
A. Kuat Tekan Beton Berpori

Hasil pengujian kuat tekan beton berpori dengan berbagai variasi campuran pada umur 7 dan 28 hari ditampilkan pada Gambar 3. Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa beton tanpa campuran cangkang sawit (P10CS0-TP) memiliki nilai kuat tekan tertinggi, yaitu sebesar 4,916 MPa pada umur 7 hari dan meningkat menjadi 5,840 MPa pada umur 28 hari. Peningkatan ini mencerminkan perkembangan kekuatan beton seiring waktu akibat proses hidrasi semen yang berkelanjutan.

Sebaliknya, penambahan cangkang sawit sebagai substitusi agregat kasar menunjukkan penurunan signifikan pada nilai kuat tekan. Pada variasi P10CS25-TP, kuat tekan menurun menjadi 2,873 MPa (7 hari) dan 1,609 MPa (28 hari). Penurunan semakin tajam pada variasi P10CS50-TP, dengan nilai kuat tekan sebesar 1,182 MPa (7 hari) dan hanya 0,593 MPa (28 hari).

Penurunan kuat tekan ini disebabkan oleh sifat fisik cangkang sawit yang memiliki kekerasan lebih rendah dibandingkan kerikil konvensional, serta struktur berpori yang lebih banyak. Hal ini mengakibatkan berkurangnya daya ikat antar partikel dalam campuran beton, sehingga mengurangi kemampuan beton dalam menahan beban tekan.

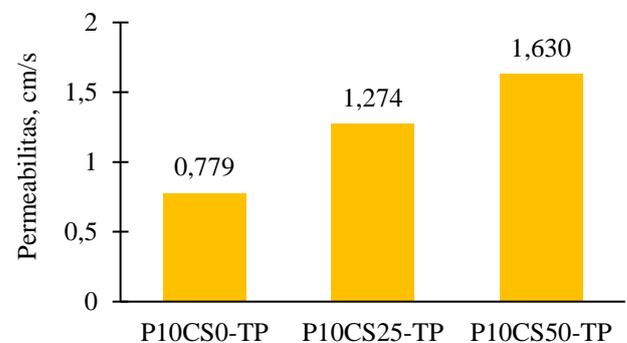
Jika dibandingkan dengan klasifikasi mutu beton berdasarkan SNI 03-0691-1990, seluruh variasi campuran tidak memenuhi batas minimum kuat tekan untuk mutu beton kelas D, yang berada pada rentang 8,5–12,5 MPa. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa penggunaan cangkang sawit dan abu cangkang sawit dalam proporsi penelitian ini belum efektif untuk menghasilkan beton berpori dengan kekuatan tekan yang sesuai standar struktural.



Gambar 3. Hasil pengujian kuat tekan umur 7 hari dan 28 hari

B. Permeabilitas Beton Berpori

Hasil pengujian permeabilitas beton berpori ditampilkan pada Gambar 4. Data menunjukkan adanya peningkatan nilai permeabilitas seiring dengan bertambahnya proporsi cangkang sawit sebagai pengganti agregat kasar. Pada variasi tanpa cangkang sawit (P10CS0-TP), nilai permeabilitas tercatat sebesar 0,779 cm/s. Nilai ini meningkat secara signifikan pada variasi P10CS25-TP menjadi 1,274 cm/s, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 1,630 cm/s pada variasi P10CS50-TP.



Gambar 4. Hasil pengujian permeabilitas beton berpori umur 28 hari

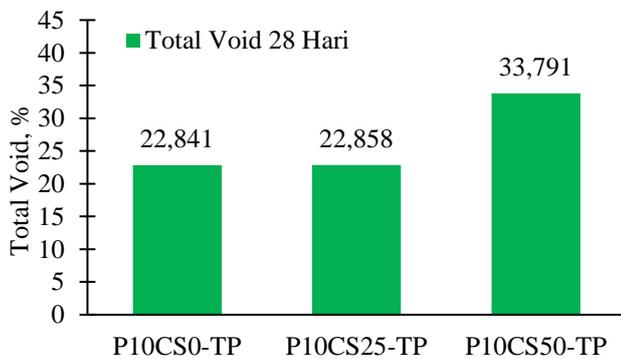
Peningkatan nilai permeabilitas ini disebabkan oleh sifat fisik cangkang sawit yang memiliki struktur lebih terbuka dan berpori dibandingkan kerikil konvensional. Hal ini menyebabkan terbentuknya lebih banyak rongga antar partikel dalam campuran beton, yang memungkinkan aliran air lebih lancar melalui struktur beton berpori. Semakin tinggi proporsi cangkang sawit

yang digunakan, semakin besar ruang kosong yang tercipta dalam campuran beton, sehingga meningkatkan laju infiltrasi air.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penambahan cangkang sawit dalam beton berpori berkontribusi positif terhadap peningkatan permeabilitas, menjadikan beton ini lebih efektif dalam aplikasi drainase lingkungan dan perkerasan ramah air.

C. Total Void Beton Berpori

Hasil pengujian total void pada umur 28 hari ditampilkan pada Gambar 5. Berdasarkan grafik, variasi campuran P10CS0-TP menunjukkan nilai total void sebesar 22,841%, sementara variasi P10CS25-TP menghasilkan nilai sebesar 22,858%, dan variasi P10CS50-TP mengalami peningkatan signifikan hingga mencapai 33,791%.



Gambar 5. Hasil pengujian total void beton berpori umur 28 hari

Peningkatan nilai total void pada variasi P10CS50-TP mengindikasikan bahwa penambahan cangkang sawit dalam jumlah besar secara nyata memperbesar volume rongga dalam beton. Hal ini disebabkan oleh bentuk cangkang sawit yang tidak rata, bertekstur kasar, dan tidak seragam jika dibandingkan dengan agregat kasar alami seperti kerikil. Ketidakteraturan bentuk ini menyebabkan distribusi partikel dalam campuran menjadi kurang rapat dan menciptakan celah atau rongga lebih banyak di antara butiran agregat.

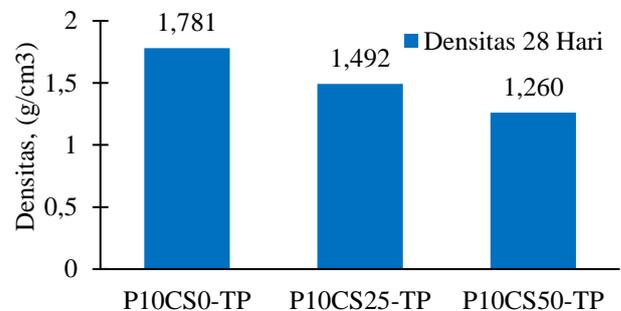
Fenomena ini sejalan dengan sifat fisik beton berpori, di mana volume rongga yang besar dapat meningkatkan permeabilitas namun berdampak negatif terhadap kekuatan mekanik. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan keseimbangan antara nilai void yang diinginkan dan kebutuhan struktural ketika merancang campuran beton berpori.

D. Densitas Beton Berpori

Hasil pengujian densitas beton berpori pada umur 28 hari disajikan pada Gambar 6. Variasi campuran P10CS0-TP (tanpa cangkang sawit) menunjukkan densitas tertinggi sebesar 1,781 g/cm³. Densitas mengalami penurunan pada variasi P10CS25-TP menjadi 1,492 g/cm³, dan mencapai nilai terendah sebesar 1,260 g/cm³ pada variasi P10CS50-TP.

Penurunan densitas ini terjadi secara konsisten seiring dengan peningkatan persentase cangkang sawit yang digunakan sebagai pengganti agregat kasar. Hal ini disebabkan oleh sifat fisik cangkang sawit yang lebih ringan dan kurang padat dibandingkan dengan kerikil alami. Selain itu, bentuk cangkang sawit yang tidak seragam turut berkontribusi terhadap peningkatan jumlah rongga atau void dalam campuran beton, sehingga massa jenis beton secara keseluruhan menjadi lebih rendah.

Densitas yang lebih rendah dapat menjadi keuntungan dalam aplikasi tertentu seperti struktur ringan atau sistem drainase, namun juga dapat berdampak negatif terhadap kekuatan dan ketahanan struktural. Oleh karena itu, pemilihan proporsi cangkang sawit dalam campuran harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dari proyek konstruksi yang akan diterapkan.



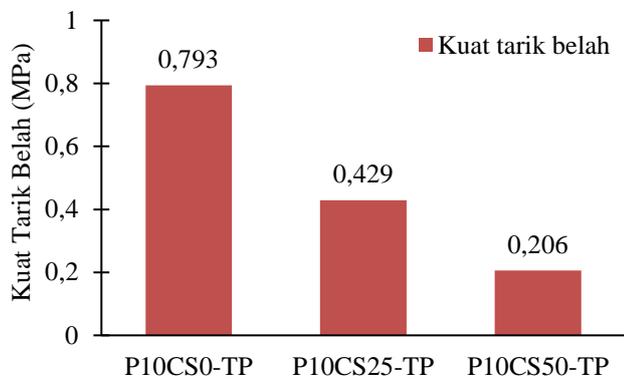
Gambar 6. Hasil pengujian densitas beton berpori umur 28 hari

E. Kuat Tarik Belah Beton Berpori

Hasil pengujian kuat tarik belah beton berpori ditampilkan pada Gambar 7. Pada variasi tanpa cangkang sawit (P10CS0-TP), kuat tarik belah mencapai nilai tertinggi sebesar 0,793 MPa. Nilai ini menurun secara signifikan pada variasi P10CS25-TP menjadi 0,429 MPa, dan semakin menurun pada variasi P10CS50-TP dengan nilai sebesar 0,206 MPa.

Penurunan nilai kuat tarik belah ini menunjukkan bahwa penambahan cangkang sawit sebagai substitusi agregat kasar berdampak negatif terhadap kekuatan tarik tidak langsung beton berpori. Hal ini disebabkan oleh sifat cangkang sawit yang cenderung kurang padat dan tidak seragam bentuknya jika dibandingkan dengan kerikil. Selain itu, cangkang sawit memiliki daya serap air yang tinggi, yang berpotensi mengganggu proses hidrasi semen karena air yang seharusnya digunakan untuk reaksi kimia terserap oleh agregat.

Kondisi tersebut menyebabkan terbentuknya ikatan antar partikel yang lebih lemah, sehingga menurunkan kekuatan tarik belah beton. Dengan demikian, semakin besar proporsi cangkang sawit yang digunakan, semakin rendah kekuatan tarik belah yang dihasilkan.



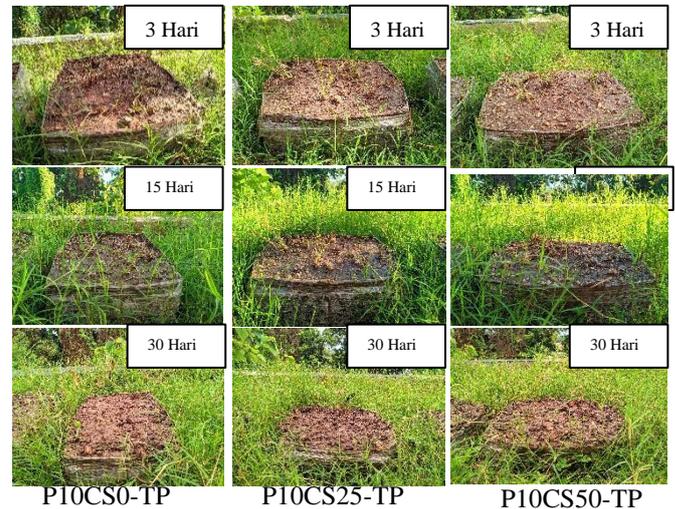
Gambar 7. Hasil pengujian kuat tarik belah beton berpori umur 28 hari.

F. Pertumbuhan Rumput Plat Beton Berpori

Hasil pengujian pertumbuhan rumput pada pelat beton berpori menunjukkan bahwa beton dengan struktur berpori mendukung pertumbuhan vegetasi secara baik. Hal ini menunjukkan bahwa beton berpori memiliki potensi sebagai material konstruksi ramah lingkungan yang mampu mempertahankan kelembaban tanah dan menyediakan akses air serta oksigen yang dibutuhkan untuk pertumbuhan akar tanaman.

Pengamatan visual menunjukkan bahwa pelat beton berpori yang mengandung cangkang sawit, yaitu P10CS25-TP dan P10CS50-TP, memberikan hasil pertumbuhan rumput yang lebih merata dan subur dibandingkan dengan pelat beton tanpa cangkang sawit (P10CS0-TP). Hal ini disebabkan oleh meningkatnya jumlah pori atau rongga dalam beton akibat penambahan cangkang sawit, yang berkontribusi terhadap infiltrasi air dan penyerapan nutrisi oleh akar rumput.

Dengan demikian, penggunaan cangkang sawit dalam beton berpori tidak hanya meningkatkan aspek permeabilitas, tetapi juga mendukung aspek ekologis, menjadikannya pilihan yang relevan untuk aplikasi di area urban seperti trotoar hijau, jalur pejalan kaki, taman kota, dan ruang terbuka hijau lainnya.



Gambar 8. Hasil pengujian pertumbuhan rumput plat

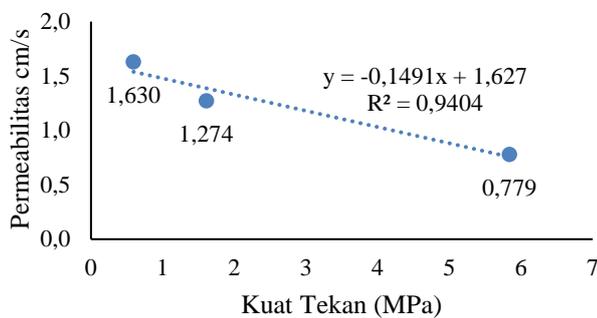
G. Hubungan antara kuat tekan dan permeabilitas beton berpori

Gambar 9 menunjukkan hubungan antara kuat tekan dan permeabilitas pada beton berpori. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat adanya hubungan negatif yang kuat antara kedua variabel. Pola ini diwakili oleh persamaan regresi linear $y = -0,1491x + 1,627$ dengan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,9404$. Koefisien regresi sebesar $-0,1491$ menunjukkan bahwa setiap peningkatan 1 MPa pada kuat tekan beton akan menyebabkan penurunan nilai permeabilitas sebesar $0,1491$ cm/s. Konstanta $1,627$ pada persamaan tersebut merupakan nilai intersep, yang menunjukkan nilai permeabilitas ketika kuat tekan bernilai nol.

Nilai $R^2 = 0,9404$ mengindikasikan bahwa model regresi linier ini mampu menjelaskan sebesar 94,04%

variasi dalam permeabilitas berdasarkan perubahan kuat tekan. Sisanya, sebesar 5,96%, dijelaskan oleh faktor lain di luar kuat tekan, seperti variasi komposisi campuran, metode pencampuran dan perawatan, serta umur benda uji.

Hubungan negatif ini menguatkan temuan bahwa peningkatan jumlah pori dan penggunaan material ringan seperti cangkang sawit yang meningkatkan permeabilitas juga berdampak pada penurunan kekuatan tekan beton. Oleh karena itu, desain campuran beton berpori harus mempertimbangkan trade-off antara kekuatan struktural dan kemampuan infiltrasi air, tergantung pada tujuan penggunaannya.



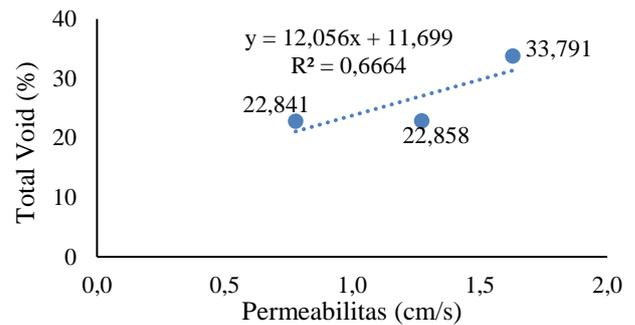
Gambar 9. Hubungan antara kuat tekan dan permeabilitas beton berpori

H. Hubungan antara permeabilitas dan total void beton berpori

Gambar 10 memperlihatkan hubungan antara nilai permeabilitas dan total void pada beton berpori, yang dianalisis menggunakan regresi linear. Persamaan regresi yang diperoleh adalah $y = 12,056x + 11,699$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,6664$. Koefisien regresi sebesar 12,056 menunjukkan bahwa setiap peningkatan 1 cm/s pada nilai permeabilitas akan mengakibatkan peningkatan total void sebesar 12,056%. Nilai konstanta sebesar 11,699 merupakan intersep yang menunjukkan nilai total void saat permeabilitas bernilai nol.

Koefisien determinasi $R^2 = 0,6664$ mengindikasikan bahwa sebesar 66,64% variasi total void dapat dijelaskan oleh perubahan pada nilai permeabilitas. Sisanya, yaitu 33,36%, dipengaruhi oleh faktor lain di luar permeabilitas, seperti variasi komposisi campuran, bentuk dan distribusi agregat, proses pencetakan beton, metode curing, serta umur material saat dilakukan pengujian.

Hubungan positif ini menguatkan temuan bahwa semakin tinggi nilai permeabilitas beton berpori, maka semakin besar pula volume rongga internal (void) yang terbentuk. Oleh karena itu, pengaruh interaksi antara permeabilitas dan total void perlu diperhatikan secara cermat dalam desain beton berpori untuk memastikan keseimbangan antara fungsi hidrolis dan kinerja mekanik.



Gambar 10. Hubungan antara permeabilitas dan total void beton berpori

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh pemanfaatan limbah cangkang sawit dan abu cangkang sawit sebagai material inovatif dalam pembuatan beton berpori ramah lingkungan. Berdasarkan hasil pengujian mekanik dan hidrolis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Kuat tekan beton berpori dari seluruh variasi campuran tidak memenuhi klasifikasi mutu beton berdasarkan SNI 03-0691-1990 (Mutu D) dengan nilai minimum 8,5 MPa. Penurunan nilai kuat tekan terjadi seiring dengan meningkatnya persentase cangkang sawit dan abu cangkang sawit dalam campuran, yang menyebabkan bertambahnya jumlah pori dan berkurangnya kerapatan struktur beton. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan material limbah tersebut dalam proporsi yang tinggi kurang efektif untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan struktural tinggi.
2. Penambahan cangkang sawit dan abu cangkang sawit terbukti meningkatkan nilai permeabilitas dan total void. Peningkatan ini menunjukkan potensi positif dari segi kemampuan beton dalam menyerap dan mengalirkan air, yang menjadikannya cocok untuk aplikasi pada area resapan, trotoar hijau, dan taman kota. Namun, peningkatan permeabilitas juga

diiringi oleh penurunan densitas dan kuat tarik belah, yang memperkuat kesimpulan bahwa pemanfaatan limbah ini lebih sesuai untuk keperluan non-struktural.

3. Hasil pengujian pertumbuhan rumput pada pelat beton berpori menunjukkan bahwa campuran dengan cangkang sawit mendukung pertumbuhan vegetasi yang lebih baik, yang mengindikasikan bahwa beton berpori dengan bahan limbah biomassa ini memiliki potensi ekologis yang layak dikembangkan lebih lanjut.

REFERENSI

- ACI Committee. 2010. ACI 522R-10, Report on Pervious Concrete. American Concrete Institute, USA.
- ASTM C 1701/C 1701M-09, Standard Test Method for Infiltration rate of In Place Pervious Concrete. ASTM Internasional.
- ASTM C1688/C1688M-08. Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete. ASTM Internasional.
- ASTM C496/C496M-04. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM Internasional.
- ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM Internasional.
- Badan Standarisasi Nasional, 1996. SNI 03-0691-1996 Bata Beton (Paving Blok). Jakarta, BSN.
- Badan Standarisasi Nasional, 2008. SNI 1973:2008 Cara uji berat isi, volume produksi campuran dan kadar udara beton. Jakarta, BSN.
- Badan Standarisasi Nasional, 2011. SNI 1974:2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder. Jakarta, BSN.
- Badan Standarisasi Nasional, 2011. SNI 2493:2011, Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium. Jakarta, BSN.
- Badan Standarisasi Nasional, 2014. SNI 2491:2014 Metode Uji Kekuatan Tarik Belah Spesimen Beton Silinder. Jakarta, BSN.
- Butarbutar, N. F. S., Siagian, D., Ginting, R., & Napitupulu, J. (2023). KAJIAN PEMANFAATAN CANGKANG SAWIT SEBAGAI BAHAN PENGGANTI AGREGAT KASAR TERHADAP KUAT TEKAN BETON f'c 30 MPa. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 12(2), 280.
<https://doi.org/10.46930/tekniksipil.v12i2.3598>
- Dasar, A., & Patah, D. (2024). Kekuatan dan Durabilitas Beton Menggunakan Palm Oil Fuel Ash (POFA) dan Pasir Pantai. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 8(1), 83–94.
<https://doi.org/10.35334/be.v8i1.5090>
- Dasar, A., Patah, D. and Okviyani, N., 2025. Impact of incorporating nano-palm oil fuel ash on the mechanical properties and durability of paving blocks prepared with seawater and sea sand for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 481, p.141539.
- Dasar, A., Patah, D., Caronge, M.A., Mahmuddin, F. and Apriansyah, A., 2024. Strength and Durability of Paving Block with Seawater and POFA (Palm Oil Fuel Ash). *Key Engineering Materials*, 1000, pp.11-22.
- Dasar, A., Patah, D., Sainuddin, S., & Caronge, M. A. Ketahanan Korosi Baja Tulangan dalam Beton menggunakan Palm Oil Fuel Ash (POFA) dan Air Laut. *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, 29(2), 243-252.
- Manaf, A., Ridhayani, I., & Nurdin, A. (2023). Pengaruh Abu Cangkang Sawit Sebagai Pengganti Semen Pada Beton Berpori. *Bandar*, 5(1), 17–26.
- Patah, D., & Dasar, A. (2023). Beton Berpori Dengan Variasi Ukuran Agregat Kasar. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 11(2), 206–212.
<https://doi.org/10.32487/jtt.v11i2.1762>
- Patah, D., Dasar, A. and Noor, N.M., 2025, January. The Effects of Palm Oil Fuel Ash on Mechanical and Durability Properties of Sustainable Foamed Concrete. In *Journal of the Civil Engineering Forum* (pp. 75-84).
- Patah, D., Dasar, A. and Nurdin, A., 2025. Sustainable concrete using seawater, sea-sand, and ultrafine palm oil fuel ash: Mechanical properties and durability. *Case Studies in Construction Materials*, 22, p.e04129.
- Simanjuntak, J. O., Saragih, T. E., Lumbangaol, P., & Panjaitan, S. P. (2020). Beton Bermutu Dan Ramah Lingkungan Dengan Memanfaatkan Limbah Abu Cangkang Sawit. *Jurnal Darma Agung*, 28(3), 387.
<https://doi.org/10.46930/ojsuda.v28i3.803>