

## PENGARUH CAMPURAN VARIASI PERSENTASE *FLY ASH* SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP SIFAT MEKANIK, PERMEABILITAS, DAN POROSITAS PADA BETON *POROUS (PERVIOUS CONCRETE)*

Berliana Ramadani<sup>1\*</sup>, Bimo Brata Adhitya<sup>1</sup>, Fitria Putri Lintang Sari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

\*Corresponding author e-mail: [berlinramadani26@gmail.com](mailto:berlinramadani26@gmail.com)

**ABSTRAK** Indonesia, khususnya Kota Palembang, rentan terhadap banjir akibat kondisi geografis dan curah hujan tinggi. Oleh karena itu, penggunaan beton berpori dapat menjadi solusi sebagai beton yang dapat mengendalikan limpasan air. Penelitian ini mengkaji pengembangan beton berpori yang berkelanjutan dengan pemanfaatan *fly ash* sebagai pengganti Sebagian semen. Bahan penyusun beton berpori terdiri dari semen, agregat, air, dan *admixture* seperti Sikament LN yang dapat mengurangi air dan meningkatkan kekuatan tekan. Metode eksperimental pada penelitian ini untuk menganalisis pengaruh variasi *fly ash* terhadap sifat mekanik (kuat tekan, kuat tarik), permeabilitas, dan porositas beton berpori. Secara keseluruhan, berbagai percobaan disiapkan dengan mengganti sebagian semen menggunakan *fly ash* hingga 30% dalam tingkat 15%. Ukuran agregat yang digunakan yaitu 12,5 mm sebagai tambahan untuk mengidentifikasi signifikansinya. Temuan eksperimental mengungkapkan bahwa sifat mekanik beton berpori meningkat dengan 25% *fly ash* sebesar 10,43 MPa untuk umur 28 hari. Setelah 28 hari perawatan, penambahan proporsi *fly ash* yang lebih tinggi (30%) mengakibatkan penurunan kekuatan tekan. Pengamatan penting lainnya adalah penurunan porositas dan permeabilitas akibat peningkatan kadar persentase *fly ash*.

Kata Kunci: Beton Berpori, *Fly ash*, Permeabilitas, Sifat Mekanik, Porositas

**ABSTRACT:** *Indonesia, particularly the city of Palembang, is prone to flooding due to its geographical conditions and high rainfall. Therefore, the use of porous concrete can be a solution as it can control water runoff. This research examines the development of sustainable porous concrete by utilizing fly ash as a partial replacement for cement. The constituent materials of porous concrete consist of cement, aggregates, water, and admixtures such as Sikament LN, which can reduce water and increase compressive strength. An experimental method was employed in this study to analyze the effects of fly ash variations on the mechanical properties (compressive strength, tensile strength), permeability, and porosity of porous concrete. Overall, various trials were prepared by replacing cement with fly ash up to 30% in increments of 15%. An aggregate size of 12,5 mm was used to further identify its significance. The experimental findings revealed that the mechanical properties of porous concrete improved with 25% fly ash, reaching 10,43 MPa at 28 days. After 28 days of curing, the addition of a higher proportion of fly ash (30%) resulted in a decrease in compressive strength. Another important observation was the reduction in porosity and permeability due to the increased percentage of fly ash content.*

Keywords: *Pervious Concrete, Fly ash, Permeability, Mechanical Properties, Porosity*

## 1. Pendahuluan

Indonesia, khususnya Kota Palembang, rentan terhadap bencana banjir. Kota dengan kondisi geografis dan intensitas curah hujan tinggi hampir dilanda banjir di setiap tahunnya [1]. Menurut data Stasiun Klimatologi Provinsi Sumatera Selatan bahwa distribusi curah hujan dasharian III kota Palembang tahun 2024 berada di level menengah sebesar 50 mm – 150 mm. Oleh karena itu, dibutuhkan material alternatif untuk mengatasi permasalahan banjir, salah satunya seperti beton berpori (*porous concrete*).

*Pervious concrete* biasa dikenal dengan beton berpori merupakan salah satu upaya alternatif beton ramah lingkungan pengendalian limpasan air. Daya serap air dan ketahanan terhadap perubahan cuaca menjadi keunggulan dari beton ini. Kekuatan tekan pada beton *porous* cenderung lebih kecil dibandingkan dengan beton konvensional, yaitu 2,8 MPa- 28 MPa dengan laju daya serap air pada perkerasan beton yang bervariasi tembus antara 0,14 cm/s hingga 1,22 cm/s [2]. Dalam upaya menerapkan konsep *green material*, maka penelitian ini memanfaatkan *fly ash* sebagai campuran (*admixture*) pengganti semen.

*Fly ash* adalah material berbutir halus hasil residu batubara yang bewarna abu-abu dan bersifat pozzolnik. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No.18 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, *fly ash* termasuk sebagai salah satu limbah yang berbahaya dan beracun (B3). Hal ini tentu dapat menimbulkan permasalahan lingkungan dan kesehatan. Namun, penelitian terdahulu menyatakan bahwa *fly ash* mampu meningkatkan sifat mekanik dari beton berpori.

Dengan adanya permasalahan tersebut maka, penggunaan *fly ash* sebagai substitusi sebagian semen terhadap beton berpori dapat menjadi alternatif *yang berkelanjutan*. Penelitian ini bertujuan untuk menguji pengaruh variasi persentase *fly ash* (0%, 15%, 20%, 25%, dan 30%) terhadap sifat mekanik, permeabilitas, dan porositas beton berpori. Dengan rentang persentase 15%-20% didasarkan pada temuan penelitian sebelumnya [3] yang menunjukkan kekuatan tekan optimal pada persentase tersebut.

Oleh karena itu, dengan dilakukan penelitian beton *porous* ini dapat menjadi alternatif dalam mengurangi permasalahan banjir/genangan, khususnya yang berdampak pada rumah tinggal masyarakat Kota Palembang. Diharapkan beton berpori dapat digunakan sebagai lapis permukaan pada perkarangan rumah tinggal yang berkonsep *green material* dan mendukung *sustainable living*.

## 2. Tinjauan Pustaka

Beton porous, atau *pervious concrete*, adalah inovasi beton yang telah dikembangkan sejak awal abad ke-20 (Wijaya, 2024). Berdasarkan ACI 522R-06, beton ini memiliki *slump* mendekati nol, terdiri dari semen, agregat kasar, sedikit atau tanpa agregat halus, air, dan *admixture*. Karakteristik uniknya adalah memiliki rongga (pori-pori) antara 15% sampai 35%, yang terbentuk akibat minimalisasi agregat halus, sehingga memfasilitasi penyerapan air ke dalam tanah dengan laju serap air (0,14 cm/s – 0,22) cm/s [12]. ACI 522R-10 mengatur syarat rasio air-semen (w/c) (0,26–0,4) dan ukuran agregat kasar (9,5 mm–19) mm. Rongga yang terbentuk membuat beton porous lebih ringan, meskipun kuat tekan yang dicapai (2,8 MPa–28 MPa) dan sifat mekanik lainnya cenderung lebih rendah dibanding beton konvensional [12]. Kelebihan utamanya menurut ACI meliputi daya serap air yang tinggi, sifat kedap suara, dan ramah lingkungan. Namun, kekurangannya adalah mudah tersumbat, terbatas untuk konstruksi non-struktural, dan memerlukan perawatan berkala

### 2.1 Material Penyusun *Porous Concrete*

#### 2.1.1 Semen

Semen merupakan salah satu bahan material beton yang berfungsi sebagai pengikat *hidrolis* berbentuk serbuk *klinker* yang ditambahkan *gips*. Bahan pembentuk semen terdiri dari batu kapur, *silica fume*, magnesium, besi, bijih besi, *clay*, dan soda *potash* [4]. Berdasarkan SNI 15-2049-2004 semen adalah bahan *hidrolis* yang dihasilkan dari hasil penggilingan terak semen *Portland* terutama yang mengandung senyawa *kalsium silikat* yang digiling bersama bahan tambahan lainnya.

#### 2.1.2 Agregat Kasar

Berdasarkan SNI 03-2847-2002 agregat kasar adalah salah satu material pembentuk beton, yang sebagian besar sebagai pengisi beton sekitar 70% berat beton berasal dari agregat. Gradasi seragam agregat adalah gradasi yang memiliki ukuran yang sama, dan gradasi menerus merupakan gradasi yang memiliki semua ukuran butiran dan penyebarannya merata [5].

### 2.1.3 Air

Menurut Tjokrodimuljo [4], Air merupakan salah satu bahan penting dalam pembuatan beton. Air berfungsi sebagai campuran untuk reaksi kimia apabila dicampur dengan semen dimana dapat menjadi pengikat untuk beton sampai proses pengerasan, menjadi bahan pelumas untuk butir-butir agregat pada campuran sehingga mortar mudah dipadatkan saat dimasukkan ke dalam cetakan atau ke *item* pekerjaan yang akan di cor. Dikehatui bahwa kebutuhan air untuk campuran beton itu sebanyak 25% dari berat semen.

### 2.1.4 Fly Ash

*Fly ash* atau disebut dengan abu batu merupakan limbah atau sisa bekas pembakaran batubara berbentuk butiran-butiraan halus yang bersifat pozzoland atau dapat bereaksi dengan kapur (CaO) pada suhu ruangan yaitu 24°C-27°C dengan bantuan air untuk membentuk senyawa yang dapat mengikat [6].

### 2.1.5 Sikament Ln

Sikament Ln merupakan bahan tambahan atau *admixture* tipe F (*Water Reducing, High Range Retarding Admixture*) yang berfungsi untuk mengurangi pemakaian air hingga 20% dan untuk meningkatkan kekuatan tekan beton hingga 40% [7].

## 2.2 Pengujian Mikrostruktur *Fly Ash* dan Semen OPC

### 2.2.1 Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM-EDS merupakan alat pendekripsi keberadaan unsur C-S-H (Kalsium-Silikat-Hidrat) dalam maateril beton dengan menganalisisnya. Mikroskop elektron pemindai (SEM) memberikan visualisasi detail dari mikrostruktur material, dengan hal ni dapat membedakan fase yang berbeda. EDS dengan kemampuan sinar-X mendekripsi dan mengidentifikasi unsur-unsur dalam suatu material [8].

### 2.2.2 X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF merupakan suatu pengujian yang bertujuan untuk mengetahui tata letak unsur dan oksidasi dari material yang terkandung dalam *fly ash* dan OPC. Hasil yang didapatkan dari pengujian XRF adalah berupa data difraktogram, lalu kemudian dapat diketahui informasi kadar material yang terkandung dalam sampel uji [9].

### 2.2.3 X-Ray Diffraction (XRD)

XRD merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengetahui fasa kristal dalam suatu material dan dapat menentukan struktur kristalnya. Hasil pengujian XRD ini diperoleh dalam bentuk data terkait komposisi kandungan unsur campuran, yang dimana data tersebut diolah dan ditampilkan dalam bentuk gambar [10].

## 2.3 Kuat Tekan (Compressive Strength)

Kekuatan tekan beton adalah kemampuan beton untuk menahan atau menerima gaya tekanan dari sisi permukaan beton per satuan luas. Semakin tinggi kekuatan struktur yang diinginkan, maka semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan [11]. Dimana syarat standar nilai kuat tekan beton *porous* menurut ACI 522R-10 berkisar 2,8 MPa — 28 MPa [12]. Berdasarkan SNI 03-1974-2011, Adapun rumus kuat tekan beton sebagai berikut:

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Keterangan :

T = Kuat tarik belah beton (MPa).

P = Beban hancur (N).

l = panjang spesimen (mm).

d = diameter spesimen (mm).

## 2.4 Kuat Tarik Belah (Split Tensile Strength)

Kuat tarik belah merupakan salah satu dari sifat mekanis beton, dimana pengujian dengan memberikan gaya tekan sepanjang diameter spesimen beton silinder pada sekitar laju yang ditentukan sampai batas keruntuhan. Kekuatan tarik belah beton cenderung lebih rendah, yaitu berkisar 10%-15% dari kuat tekan yang dimiliki beton [13]. Adapun rumus kuat tarik belah yang ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$T = \frac{2P}{\pi \times l \times d} \quad (2)$$

Keterangan:

T = Kuat tarik belah (N/mm<sup>2</sup>)

P = Beban maksimum (N)

l = Panjang benda uji (mm)

d = Diameter (mm)

## 2.5 Porositas (Porosity)

Porositas beton merupakan hubungan perbandingan antara volume pori atau volume yang diisi oleh fluida terhadap volume benda uji (volume total beton). Berdasarkan ACI (*American Concrete Institute*) 522R-10 besarnya nilai porositas pada beton berpori

berada pada rentang 15%—35% . Rumus mengenai porositas dapat dilihat pada persamaan:

$$P = \left[ 1 - \left( \frac{W_1 - W_2}{\rho_w V} \right) \right] \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

P = Porositas (%)

W<sub>1</sub> = Beban sampel kering (kg)

W<sub>2</sub> = Berat sampel direndam air (kg)

V = Volume sampel (m<sup>3</sup>)

ρ<sub>w</sub> = Massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>)

## 2.6 Permeabilitas (Permeability)

Menurut Neville (1995), Permeabilitas beton merupakan kemampuan rongga atau pori-pori pada beton ringan untuk dilalui air. Campuran air semen yang mengeras mengandung banyak partikel, dimana dihubungkan antar permukaan yang jumlahnya relatif kecil dari total permukaan partikel [13].

Pada pengujian ini menggunakan metode dan alat *Falling Head Permeability*. *Falling Head Permeability* merupakan metode yang digunakan karena lebih sederhana dan mudah dibuat. Metode *falling head* ini menggunakan tabung yang berisi air pada ketinggian tertentu dan setelah itu mengukur penurunan ketinggian air [14]. Koefisien permeabilitas dapat dihitung memakai persamaan Hukum Darcy:

$$K = 2,303 \times \frac{a \times L}{t \times A} \times \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (4)$$

Keterangan:

K = koefisien permeabilitas (cm/det).

L = Panjang / tinggi sampel (cm).

A = Luas penampang sampel (cm<sup>2</sup>).

a = Luas penampang tabung (cm<sup>2</sup>).

T = Waktu aliran antara air h<sub>1</sub> dan h<sub>2</sub> (det).

h<sub>1</sub> = Permukaan air awal (cm).

h<sub>2</sub> = Permukaan air akhir (cm).

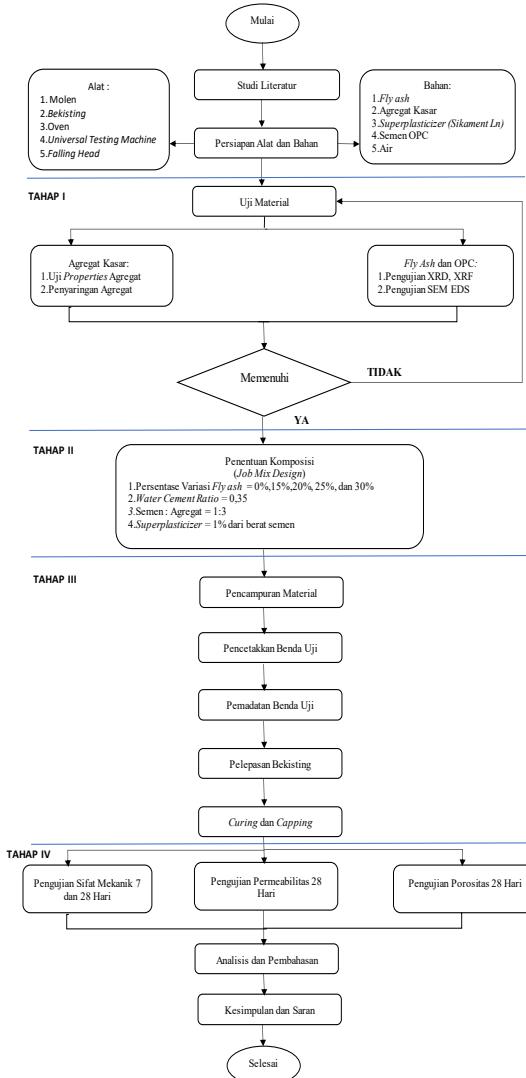
## 2.7 Ruang Kapilaritas

Menurut P. Kumar Mehta, (2001:26) bahwa ruang kapilaritas merupakan ruang yang tidak terisi oleh komponen padat dari hasil semen *Portland*. Ruang yang tidak ditempati oleh semen atau produk hidrasi terdiri dari ruang kapiler, volume dan ukuran ruang ditentukan oleh jarak awal antara partikel semen anhidrat dalam pasta semen baru dicampur rasio air semen dan tingkat hidrasi.

## 3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan cara percobaan di Laboratorium Struktur dan Konstruksi Material Universitas Sriwijaya. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Penelitian ini memiliki lima pengujian utama yaitu pengujian *properties* material,

pengujian kuat tekan beton, pengujian kuat tarik belah beton, pengujian permeabilitas, dan pengujian porositas. Adapun alur penelitian digunakan sebagai pedoman yang menjelaskan tahapan-tahapan penelitian dari awal hingga akhir pada penelitian yang akan dilakukan. Diagram alur penelitian penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alur penelitian

Penelitian dilakukan persiapan alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini. Setelah itu pada tahap pertama, dilakukan Pengujian material *properties* seperti agregat dan semen digunakan untuk dapat menentukan formula atau proporsi campuran yang sesuai dengan kekuatan beton yang akan direncanakan. Pengujian agregat yang dilakukan adalah pemeriksaan berat volume, *specific gravity* dan penyerapan, kadar air, dan kadar lumpur agregat. Sedangkan pengujian *properties* *fly ash* dan semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) dilakukan dengan pengujian mikrostruktur yaitu pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan pengujian *Scanning Electron*

Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS). Adapun gambar tabel perencanaan campuran yang digunakan yaitu:

Variasi	Fly ash					Agregat				
	0%	15%	20%	25%	30%	mm	Air	ACR	FAS	SP
CFA0%	430	-	-	-	-	-				
CFA15%	365,5	64,5	-	-	-	-				
CFA20%	344	-	86	-	-	1521	150	3,54	0,35	4,3
CFA25%	322,5	-	-	107,5	-	-				
CFA30%	301	-	-	-	129	-				

Gambar 3.2 Tabel Job Mix Design Beton Porous

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi persentase *fly ash* sebagai substitusi semen terhadap sifat mekanik, porositas, dan permeabilitas pada beton porous.

##### 4.1 Hasil Pengujian Agregat Kasar

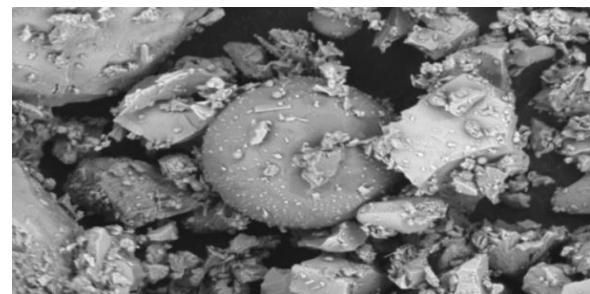
Penelitian ini menggunakan agregat yang berasal dari Bojonegoro atau biasa disebut batu split merak. Pengujian yang dilakukan meliputi, pengujian kadar air agregat kasar, pengujian berat isi/volume agregat kasar, pengujian kadar lumpur, pengujian *specific gravity* dan penyerapan, Adapun hasil pengujian yang dilakukan sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil pengujian agregat kasar

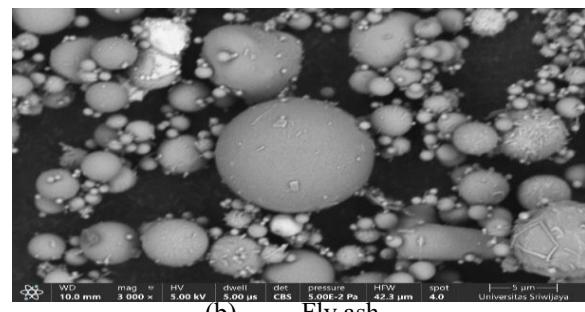
Jenis Pengujian	Hasil Pengujian
Kadar air agregat	1,420%
Berat Jenis (SSD)	2,145%
Berat Jenis (Kering)	2,054%
Berat Jenis (Basah)	2,269%
Penyerapan	4,346%
Berat isi lepas	1,234 Kg/liter
Berat isi penusukan	1,339 Kg/liter
Kadar lumpur	3,000%

##### 4.2 Hasil Pemeriksaan *Fly Ash*

Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS)



(a) OPC

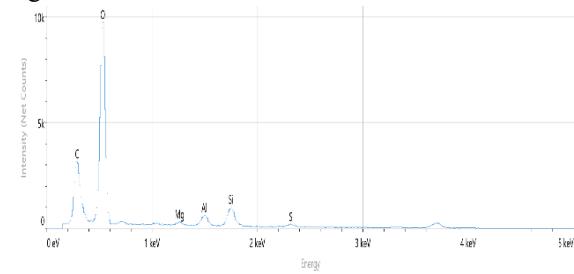


(b) Fly ash

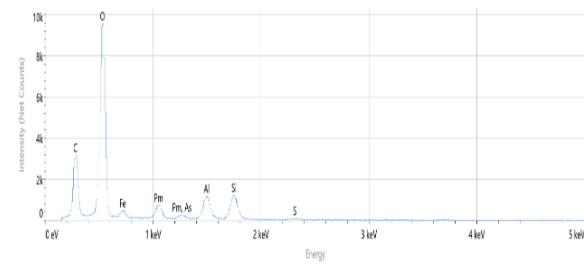
Gambar 4.1 (a) SEM OPC (b) SEM *Fly ash*

Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Selain itu hasil pengamatan EDS berupa data grafik yang mengidentifikasi adanya unsur tersebut dalam material. Adapun gambar grafik hasil pengamatan EDS sebagai berikut :



(a) OPC



(b) Fly ash

Gambar 4.2 (a) EDS OPC (b) EDS *Fly ash*

Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

### X-Ray Fluorescence (XRF)

Hasil analisis XRF untuk *fly ash* dapat dilihat pada hasil pengamatan XRF *fly ash* menunjukkan dominasi  $\text{SiO}_2$  (53,622%), yang bereaksi dengan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  membentuk C-S-H.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (27,061%) meningkatkan kekuatan dan ketahanan sulfat.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mempengaruhi warna, dan  $\text{CaO}$  (4,20%) mengindikasikan *fly ash* kelas F, yang bereaksi dengan air dan silika/alumina. Kandungan  $\text{CaO}$  memberikan sifat hidraulik dan meningkatkan kekuatan awal beton. Senyawa lain hadir dalam persentase kecil.

Tabel 4.2 Hasil Pemeriksaan *X-Ray Fluorescence* OPC

Komposisi Kimia	Jumlah (%)
$\text{CaO}$	65,169
$\text{SiO}_2$	20,553
$\text{Al}_2\text{O}_3$	6,043
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,158
$\text{SO}_3$	2,515
$\text{MgO}$	0,763
$\text{K}_2\text{O}$	0,687
$\text{Na}_2\text{O}$	0,434
$\text{TiO}_2$	0,216
$\text{SrO}$	0,190
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,118
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,060
$\text{Mn}_2\text{O}_3$	0,053

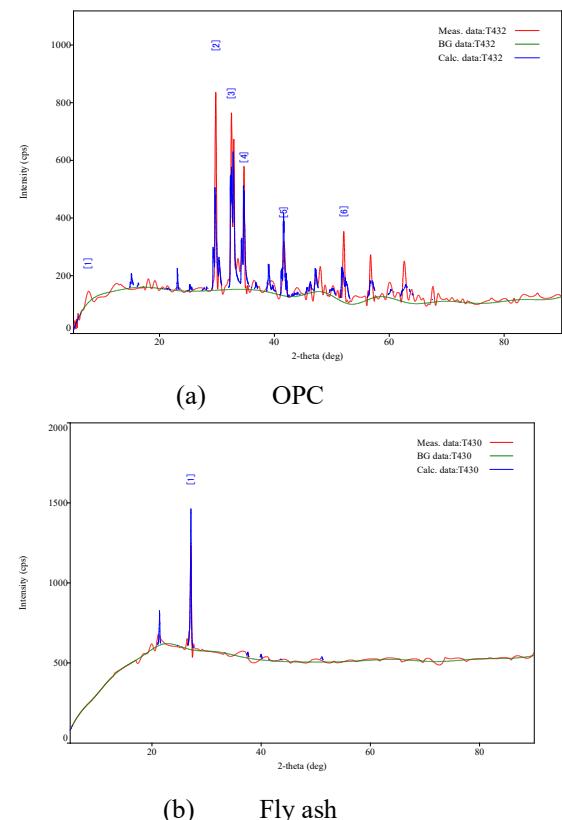
Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Tabel 4.3 Hasil Pemeriksaan *X-Ray Fluorescence Fly Ash*

Parameter	Hasil Analisa
$\text{SiO}_2$	53,62%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	27,06%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6,11%
$\text{Na}_2\text{O}$	4,33%
$\text{CaO}$	4,20%
$\text{MgO}$	1,64%
$\text{K}_2\text{O}$	1,02%
$\text{TiO}_2$	0,87%
$\text{SO}_3$	0,77%
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,32%
$\text{Mn}_3\text{O}_4$	0,06%

Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

### X-Ray Diffraction (XRD)



Gambar 4.3 Hasil Pemeriksaan *X-Ray Diffraction* (XRD) (a) OPC (b) Fly ash

Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Pada gambar (a) menunjukkan semen OPC memiliki fase kristalin dengan puncak tertinggi pada 29,83°C, mengindikasikan struktur kristalin. Senyawa hatrurite ( $\text{Ca}_{27}\text{O}_{45}\text{Si}_9$ ) terdeteksi, senyawa dasar semen Portland. Lalu pada (b) menunjukkan terdapat struktur amorf dengan sedikit puncak kristalin pada *fly ash*, terdeteksi pada 27,127°C. Nilai FWHM 0,10° mengindikasikan ukuran kristal yang kecil. Grafik difraktogram memperlihatkan hubungan intensitas dan sudut difraksi.

### 4.3 Hasil Pengujian Berat Volume Beton *Porous*

Pemeriksaan berat volume beton *porous* memiliki tujuan untuk mengetahui berat beton *porous* per satuan volume. Hasil pemeriksaan disajikan dalam bentuk tabel pada setiap umur beton yaitu 7 hari dan 28 hari sebagai berikut:

Tabel 4.4 Hasil Pemeriksaan Berat Volume 7 Hari

Variasi	Berat Benda Uji (Kg)	Volume Benda Uji (m <sup>3</sup> )	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	Rata-rata Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )
CFA0%	8,55	0,0053	1613,02	
	9,34	0,0053	1762,83	1667,67
	8,62	0,0053	1627,17	
CFA15%	9,02	0,0053	1701,51	
	8,63	0,0053	1627,36	1702,08
	9,42	0,0053	1777,36	
CFA20%	9,34	0,0053	1762,26	
	8,98	0,0053	1694,34	1745,09
	9,43	0,0053	1778,68	
CFA25%	9,39	0,0053	1772,45	
	9,42	0,0053	1777,74	1785,79
	9,58	0,0053	1807,17	
CFA30%	8,32	0,0053	1569,25	
	9,29	0,0053	1751,89	1713,33
	9,64	0,0053	1818,87	

Tabel 4.5 Hasil Pemeriksaan Berat Volume 28 Hari

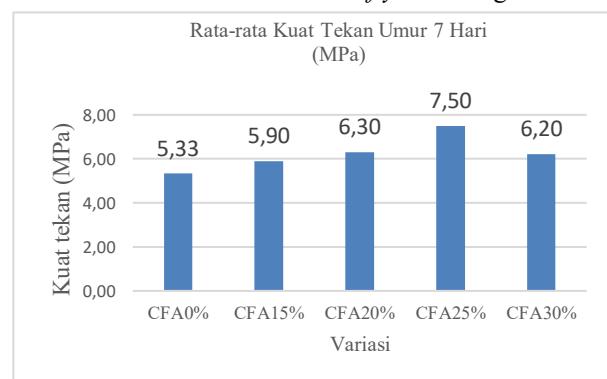
Variasi	Berat Benda Uji (Kg)	Volume Benda Uji (m <sup>3</sup> )	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	Rata-rata Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )
CFA0%	9,54	0,0053	1800,00	
	9,52	0,0053	1796,23	1798,11
	9,53	0,0053	1798,11	
CFA15%	9,53	0,0053	1797,74	
	9,45	0,0053	1782,26	1821,19
	9,98	0,0053	1883,58	
CFA20%	9,77	0,0053	1843,40	
	9,59	0,0053	1808,68	1837,04
	9,85	0,0053	1859,06	
CFA25%	9,61	0,0053	1813,40	
	9,76	0,0053	1840,94	1848,30
	10,02	0,0053	1890,57	
CFA30%	9,34	0,0053	1762,08	
	9,76	0,0053	1841,89	1831,07
	10,01	0,0053	1889,25	

Penggunaan *fly ash* pada beton berpori umumnya meningkatkan berat volume/densitas hingga mencapai puncak pada variasi 25% *fly ash* (1848,30 kg/m<sup>3</sup> pada 28 hari). Peningkatan ini terjadi karena partikel *fly ash* yang halus mengisi pori-pori dan memperkuat ikatan matriks beton melalui reaksi pozzolanik. Namun, pada persentase (30%) berat volume beton menurun karena berat jenis *fly ash* lebih rendah dari semen dan substitusi semen yang berlebihan mengganggu reaksi pozzolanik, menyebabkan struktur semen memiliki pori lebih besar dan kepadatan berkurang.

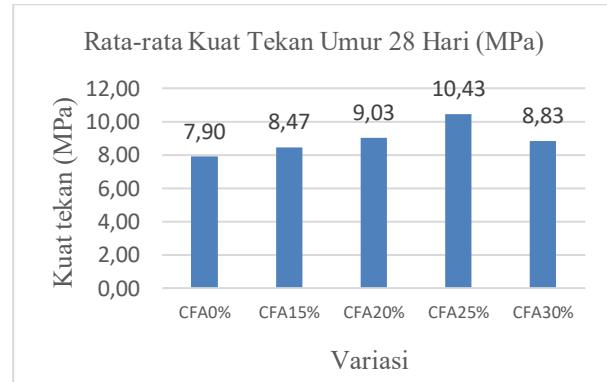
#### Pengujian Kuat Tekan Beton Porous

Pengujian kuat tekan dilakukan dengan memberi beban maksimum vertikal pada benda uji silinder (N/mm<sup>2</sup>). Pada umur 7 dan 28 hari, terlihat pada

persentase CFA25% menghasilkan kuat tekan tertinggi, yaitu 7,5 MPa dan 10,43 MPa, meningkat seiring bertambahnya persentase *fly ash*. Namun pada CFA30% kuat tekan mengalami penurunan. Kuat tekan beton berpori yang menggunakan *fly ash* sebagai pengganti semen sangat dipengaruhi oleh ketersediaan kalsium hidroksida (CaOH<sub>2</sub>) yang dihasilkan dari hidrasi semen. Semakin banyak semen yang diganti *fly ash*, semakin sedikit (CaOH<sub>2</sub>) yang terbentuk. *fly ash* berfungsi sebagai pozzolan, yang mengandung silika dan alumina, dan akan bereaksi dengan (CaOH<sub>2</sub>) untuk membentuk senyawa baru yang mengikat seperti semen, yaitu kalsium aluminat hidrat (tobermorite), yang berperan meningkatkan kuat tekan beton. Oleh karena itu, terdapat batasan maksimal substitusi *fly ash* agar reaksi



Kuat Tekan Umur 7 Hari

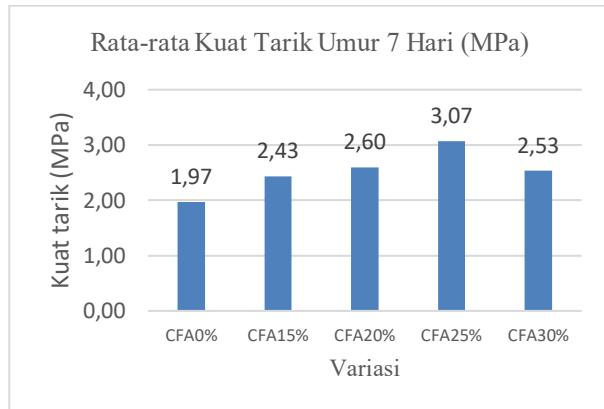


Gambar 4.5 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Kuat Tekan Umur 28 Hari

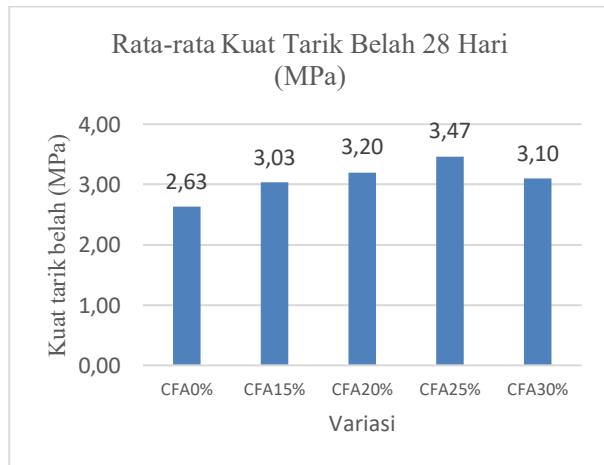
#### Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Porous Geopolimer

Pengujian kuat tarik belah dalam penelitian ini diuji dengan beban horizontal maksimum (satuan Newton). Hasil pengujian kuat tarik beton berpori menunjukkan pola peningkatan yang sama pada usia 7 hari dan 28 hari seiring substitusi semen dengan *fly ash*, mencapai nilai optimal pada persentase 25% dan kemudian menurun pada 30%. Pada umur 7 hari, kuat tarik tertinggi dicapai

pada 25% *fly ash* sebesar 3.07 MPa (dibandingkan 1.97 MPa pada 0% *fly ash*), sementara pada umur 28 hari, nilai tertinggi juga pada 25% *fly ash* yaitu 3.47 MPa (dibandingkan 2.63 MPa pada 0% *fly ash*). Peningkatan kuat tarik ini selaras dengan peningkatan kuat tekan, yang dipengaruhi oleh faktor-faktor yang sama, seperti bertambahnya pengisian pasta semen.



Gambar 4.6 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Umur 7 Hari



Gambar 4.7 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Umur 28 Hari

#### Pengujian Permeabilitas Beton Porous

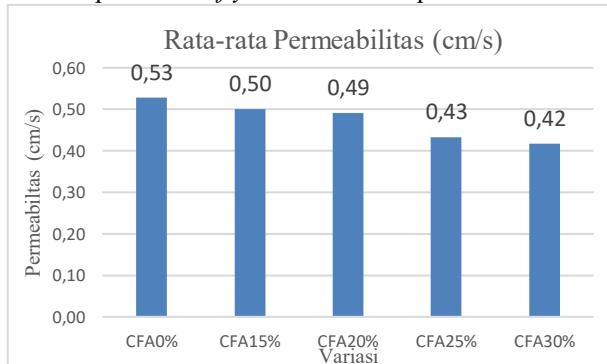
Permeabilitas diukur pada umur 28 hari menggunakan konsep hukum Darcy (cm/detik), dengan rata-rata dari tiga sampel per variasi. Berikut hasil permeabilitas beton porous pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Data Hasil Pengujian Permeabilitas

Variasi	Permeabilitas (cm/s)	Rata-rata Permeabilitas (cm/s)
CFA0%	0,5 0,52	0,53

	0,56	
	0,53	
CFA15%	0,51	0,5
	0,46	
	0,48	
CFA20%	0,5	0,49
	0,49	
	0,46	
CFA25%	0,45	0,43
	0,01	
	0,46	
CFA30%	0,44	0,42
	0,36	

Dari diagram diatas bahwa nilai permeabilitas tertinggi berada pada variasi CFA0% (100% semen dan 0% *fly ash*) sebagai variable kontrol. Hasil permeabilitas pada beton *porous* ini terus mengalami penurunan dari variasi persentase *fly ash* 15% sampai 30%. Hal ini



Gambar 4.8 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Permeabilitas Umur 28 Hari

Peningkatan persentase *fly ash* sebagai substitusi semen pada beton berpori menyebabkan penurunan permeabilitas. Hal ini terjadi karena partikel *fly ash* semakin efektif mengisi dan menyumbat pori-pori makro beton, yang mengurangi kemampuan air untuk melewatkannya dan memperlama waktu aliran. Meskipun permeabilitas menurun seiring penambahan *fly ash*, semua hasil pengujian yang didapat masih memenuhi standar ACI 522R-10, yaitu berada dalam kisaran 0,14 cm/s - 1,22 cm/s.

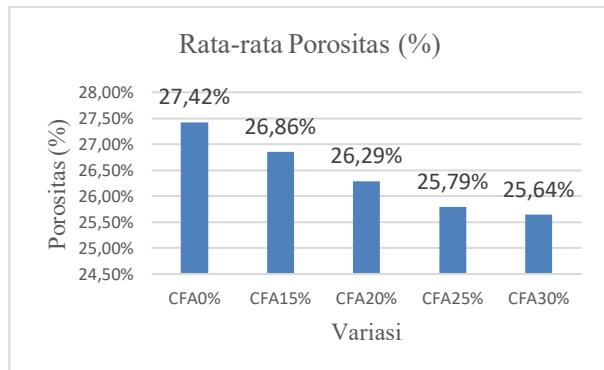
#### Pengujian Porositas Beton Porous

Pengujian porositas menggunakan benda uji berumur 28 hari, dengan sampel sebanyak 3 buah pada setiap variasi *fly ash*. Tujuan dari pengujian porositas ini untuk mengetahui persentase pori atau *void* beton *porous*. Adapun hasil pengujian porositas dapat dilihat pada tabel 4.7

Tabel 4.7 Data Hasil Pengujian Porositas

Variasi	Porositas (%)	Rata-rata Porositas (%)
CFA0%	25,35%	27,42%
	25,33%	
	31,60%	
CFA15%	28,03%	26,86%
	32,64%	
	19,91%	
CFA20%	26,79%	26,29%
	24,56%	
	27,51%	
CFA25%	26,45%	25,79%
	22,17%	
	28,75%	
CFA30%	30,83%	25,64%
	28,27%	
	17,81%	

Dari diagram tersebut dapat dilihat bahwa nilai porositas terendah terdapat pada campuran variasi CFA25% sebesar 25,79%. Adapun nilai porositas terbesar berada pada campuran variasi CFA0% sebesar 27,42%. Nilai porositas terus mengalami penurunan dari variasi persentase *fly ash* 15% sampai 30%. Adanya reaksi pozzolan dengan kalsium hidroksida menghasilkan C-S-H, C-S-H ini yang mengisi rongga tersebut hingga membentuk area *impermeable*.



Gambar 4.9 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Porositas Umur 28 Hari

Peningkatan molaritas NaOH mempercepat pelarutan *fly ash*, membentuk lebih banyak gel sodium aluminosilikat hidrat (N-A-S-H) yang mengisi pori, sehingga porositas menurun. Semua variasi tetap memenuhi standar ACI 522R-10 yang berada dalam rentang 15%-35%.

## 5. Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian berkaitan dengan sifat mekanik, permeabilitas, dan porositas dari campuran variasi *fly ash* pada beton *porous* dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain sebagai berikut:

1. Pada hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai substitusi semen dengan berbagai variasi berpengaruh terhadap sifat mekanik beton *porous*. Penggantian *fly ash* untuk sebagian semen dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah hingga persentase tertentu.
2. Peningkatan terjadi pada campuran beton berpori dengan 25% *fly ash*, menghasilkan kuat tekan optimal yaitu 7,50 MPa umur 7 hari dan 10,43 MPa umur 28 hari, serta tarik belah tertinggi yaitu 3,07 MPa dan 3,47 MPa pada umur 28 hari.
3. Dari hasil pengujian dengan penambahan *fly ash* sebagai substitusi semen memengaruhi nilai permeabilitas dan porositas yang mengalami penurunan. Semakin tinggi persentase *fly ash* diatas 25% maka, permeabilitas dan porositas beton cenderung menurun.
4. Beton *porous* dengan variasi persentase 25% *fly ash* sebagai pengganti semen menunjukkan hasil yang efektif dalam meningkatkan sifat mekanik beton, meskipun terjadi penurunan permeabilitas dan porositas.
5. Pada hasil pengujian kuat tekan dengan campuran variasi *fly ash* dapat meningkatkan kuat tekan beton berpori, akan tetapi belum dapat mencapai kuat tekan yang direncanakan sesuai dengan standart Bina Marga tentang Perkerasan Jalan Beton Berpori untuk trotoar dan taman (perkarangan rumah) yaitu sebesar  $f_c = 20$  MPa. Namun, kuat tekan beton berpori telah memenuhi persyaratan ACI 522R-10 yaitu pada range 2,8 MPA-28 MPA.
6. Pada hasil pengujian permeabilitas yang didapatkan sebesar 25,64%-27,42%, hal tersebut telah memenuhi persyaratan ACI 522R-10 dengan syarat nilai 15%-35%.
7. Pada hasil pengujian permeabilitas yang didapatkan sebesar 0,42 cm/s -0,53 cm/s, hal tersebut telah memenuhi persyaratan ACI 522R-10 dengan syarat nilai 0,14 cm/s-1,22 cm/s.

### 5.2 Saran

Pada saat dilakukannya penelitian ini kemungkinan terdapat kesalahan-kesalahan yang dilakukan. Untuk memperkecil kesalahan dan memperoleh hasil yang lebih baik, disini penulis memberikan beberapa saran agar perlu memperhatikan hal-hal sebagai berikut:

1. Pemilihan bahan material penting diperhatikan agar kualitas beton semakin meningkat.
2. Proses pembuatan beton berpori dan penambahan air juga penting diperhatikan agar tidak kekeringan atau terlalu encer, serta proses pemanasan harus lebih maksimal.
3. Variasi substitusi *fly ash* dapat lebih dikembangkan lagi atau dengan modifikasi agar mendapatkan nilai kuat tekan beton berpori yang lebih besar dan dapat diaplikasikan ke kehidupan sehari-hari.

#### Daftar Pustaka

[1] H. G. Apriadi and A. Saggaf, “KAJIAN PENANGANAN BANJIR DENGAN SISTEM POMPA DI SUNGAI BENDUNG , KOTA PALEMBANG STUDY OF FLOOD MITIGATION WITH PUMPING SYSTEM AT BENDUNG RIVER PALEMBANG CITY,” pp. 49–58, 2021.

[2] A. Setiawan and M. Teguh, “Optimalisasi Campuran Beton Porous Dengan Bahan Tambah Abu Batu Kerajinan Batuan Gunung Merapi \_ Setiawan \_ Bulletin of Civil Engineering.pdf,” vol. 2, p. 2, 2022.

[3] S. Bright *et al.*, “Effect of fly ash addition on the mechanical properties of pervious concrete,” in *Material Today : Proceedings ISSN: 2214-7853*, Elsevier BV, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128476>.

[4] F. Hamdi *et al.*, *Teknologi Beton*, Pertama. Makassar: CV. Tohar Media, 2022.

[5] S. Samsul, M. Mustakim, and K. Kasmaida, “Pengaruh Ukuran Butir Agregat Kasar Terhadap Kapasitas Kuat Tekan Dan Nilai Slump Beton Porous,” *J. Karajata Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 124–127, 2023, doi: 10.31850/karajata.v3i2.2713.

[6] E. Purnamasari, R. Adawiyah, and T. A. Rachman, “ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN FLY ASH PADA BETON POROUS YANG DIRENDAM DILAHAN GAMBAT,” Islam Kalimantan Muhammad Arsyad Al Banjari, 2022.

[7] M. J. Alkas, B. Haryanto, and M. A. Putra, “TEKAN DAN LAJU INFILTRASI BETON POROUS INFLUENCE ANALYSIS OF ADDITION OF ‘ SIKAMENT LN ’ IN AGREGATES VARIATION TO COMPRESSIVE STRENGTH AND WATER INFILTRATION ON PERVERIOUS CONCRETE,” no. 152, pp. 7–16, 2024.

[8] Y. Zuriatni, M. Sofyan, P. S. Putri, A. Rokhman, and I. W. Kustanrika, “Analisis SEM-EDS Beton Normal yang Menggunakan Superplasticizer,” *Tek. Sipil*, vol. 7, no. 3, 2023.

[9] Y. F. Prakasa, M. R. Asrori, and D. Rachmadika, “Analisis Kandungan Mineral Pasir Pantai Bajul Mati Kabupaten Malang Menggunakan XRF dan XRD,” vol. 5, no. 2, pp. 58–62, 2020, doi: 10.37033/fjc.v5i2.154.

[10] Sunyoto, H. Rudianto, and I. Setyawan, “Tampilan PENGEMBANGAN KOMPOSISI MATERIAL PADA PEMBUATAN PLAIN BEARING INTERNAL COMBUSTION ENGINE (ICE) DENGAN MEMODIFIKASI KOMPOSISI AL-SI-CU-SN,” *PRESISI*, vol. 26, no. 1, 2024.

[11] C. Q. Ondang, S. E. Wallah, and R. S. Windah, “SIFAT MEKANIK DAN PERMEABILITAS BETON POROUS,” vol. 8, no. 4, pp. 4–9, 2020.

[12] E. RD Ambun, P. R. Rangan, and M. Palembangan, “ANALISIS KINERJA BETON BERPORI,” *Dyn. sainT*, vol. 7, p. 7, 2022.

[13] P. R. Rangan, “Pengaruh Pemanfaatan Cornice Adhesive Sebagai Bahan Tambahan Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Berpori,” vol. 1, pp. 2981–2991, 2023.

[14] Y. Zhang, H. Li, A. Abdelhady, and J. Yang, “Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, p. 120614, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120614.

[15] P. J. M. M. P. Kumar Mehta, *Microstructure, Properties, and Materials*, vol. 1. 2001.