

Pengaruh Penggunaan Fly Ash sebagai Pengganti Sebagian Semen terhadap Porositas, Laju Perkolasi, dan Kuat Tekan (Porous Concrete)

Bayu Nova Febriansyah*, Slamet Widodo, Faqih Ma'arif, dan Maris Setyo Nugroho

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta 55281, Indonesia

ABSTRAK

Kata Kunci:

Beton Berongga
Fly Ash
Porositas
Laju Perkolasi
Kuat Tekan

Pembangunan infrastruktur di Indonesia berkembang pesat, namun mengurangi lahan hijau dan mengakibatkan masalah lingkungan seperti banjir dan kerusakan lahan parkir akibat genangan air. Penggunaan beton berongga sebagai solusi konstruksi membantu mengatasi masalah tersebut dengan memungkinkan air meresap ke dalam tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan limbah *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen terhadap nilai porositas, laju perkolasai, dan kuat tekan beton berongga. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilaksanakan di Laboratorium Bahan Bangunan, Departemen Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta. *Fly Ash* digunakan sebagai pengganti sebagian semen dengan 5 variasi yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, dengan kode benda uji S00, S05, S10, S15, dan S20. Masing-masing variasi melibatkan 5 sampel uji. Sampel sebanyak 75 silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian dilakukan setelah periode curing selama 28 hari. Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif kuantitatif menggunakan *microsoft excel* untuk proses analisis data guna mengatahui efek dari menggunakan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen. Nilai rerata porositas untuk variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% adalah masing-masing 10,59%, 9,92%, 10,42%, 9,99%, dan 9,7%. Nilai rerata laju perkolasai dengan variasi yang adalah 0,468 cm/s, 0,324 cm/s, 0,419 cm/s, 0,355 cm/s, 0,314 cm/s. Nilai rerata kuat tekan dengan variasi yang sama masing-masing adalah 18,86 MPa, 15,99 MPa, 16,79 MPa, 15,05 MPa, dan 17,66 MPa. Hasil penelitian menyatakan nilai optimum untuk pengaplikasian beton berongga pada lahan parkir dengan menggunakan *Fly Ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen yaitu pada presentase 20%.

ABSTRACT

Keywords:

Porous Concrete,
Fly Ash,
Porosity
Percolation Rate,
Compressive Strength

Infrastructure development in Indonesia is growing rapidly, but it reduces green spaces and results in environmental problems such as flooding and damage to parking lots due to waterlogging. The use of porous concrete as a construction solution helps to overcome the problem by allowing water to seep into the soil. This study aims to determine the effect of the use of Fly Ash waste as a partial substitute for cement on the porosity value, percolation rate, and compressive strength of porous concrete. This research uses an experimental method carried out at the Building Materials Laboratory, Department of Civil Engineering Education and Planning, Faculty of Engineering, Yogyakarta State University. Fly Ash is used as a partial replacement for cement with 5 variations, namely 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%, with specimen codes S00, S05, S10, S15, and S20. Each variation involves 5 test samples. The sample is 75 cylinders with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm. The test was carried out after a curing period of 28 days. The data obtained was analyzed in a quantitative descriptive manner using Microsoft Excel for the data analysis process to find out the effect of using Fly Ash as a substitute for some cement. The average porosity values for the 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% variations were 10.59%, 9.92%, 10.42%, 9.99%, and 9.7%, respectively. The average values of percolation rate with variations were 0.468 cm/s, 0.324 cm/s, 0.419 cm/s, 0.355 cm/s, 0.314 cm/s. The average values of compressive strength with the same variation were 18.86 MPa, 15.99 MPa, 16.79 MPa, 15.05 MPa, and 17.66 MPa, respectively. The results of the study stated that the optimum value for the application of porous concrete in the parking lot using Fly Ash as a substitute for part of the cement was at a percentage of 20%.



This is an open access article under the CC-BY license.

1. Pendahuluan

Dewasa ini, Indonesia telah mengalami perkembangan pembangunan infrastruktur secara pesat. Akan tetapi,

perkembangan ini mengurangi lahan-lahan hijau yang berfungsi sebagai penyerapan air. [4] Salah satu isu lingkungan yang perlu menjadi prioritas di Indonesia

*Corresponding author.

E-mail: bayunova.2020@student.uny.ac.id

Available online 30 September 2024

adalah pengolahan air dan minimnya kesadaran masyarakat untuk membuang sampah pada tempatnya. Penghijauan dan pengolahan sampah sangat penting untuk mencegah penyumbatan saluran air yang berisiko menyebabkan banjir saat musim hujan, yang juga mengakibatkan kerusakan pada perkerasan lahan parkir.

Kerusakan lahan parkir akibat perkerasan yang tidak teratur menjadi masalah serius di lingkungan perkotaan. Perkerasan yang retak atau rusak dapat merusak kendaraan, seperti menyebabkan ban pecah atau masalah suspensi. Selain itu, air hujan yang tidak bisa meresap dengan baik ke dalam tanah karena perkerasan yang rusak bisa menyebabkan genangan air dan bahkan banjir kecil di area parkir. Hal ini tidak hanya mengganggu pengguna parkir, tetapi juga merugikan pemilik kendaraan dan mengganggu estetika lingkungan [1]. Oleh karena itu, pemeliharaan rutin dan pengawasan ketat terhadap kondisi perkerasan sangat diperlukan.

Salah satu solusi dalam sektor konstruksi untuk mengatasi masalah ini adalah menerapkan metode pembangunan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Beton berongga merupakan salah satu alternatif yang ramah lingkungan dalam konstruksi perkerasan. Beton ini memiliki rongga yang memungkinkan air meresap ke dalam tanah, mengatasi masalah drainase. Meskipun penggunaan beton berongga masih jarang dalam proyek konstruksi, keunggulannya sebagai material multifungsi menjadikannya pilihan menarik untuk green engineering di masa depan [9].

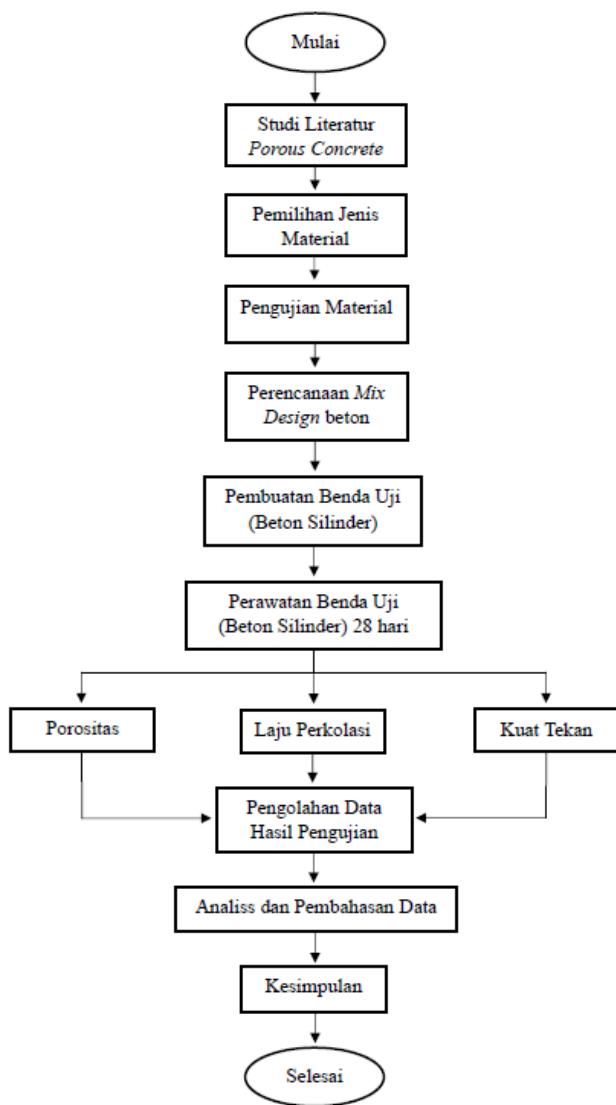
Berdasarkan data dari PT PLN (Persero), kebutuhan batu bara untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) diperkirakan meningkat hingga tahun 2030, dari 113,6 juta ton pada tahun 2021 menjadi 156,3 juta ton pada tahun 2030. Proses pembakaran batu bara menghasilkan limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA). Perkiraaan limbah FABA di Indonesia akan mencapai 162 juta ton pada tahun 2027. Namun, pemanfaatan limbah FABA di Indonesia masih sekitar 45%, jauh di bawah negara-negara tetangga seperti India, Korea Selatan, dan Jepang yang memanfaatkan limbah FABA sebesar 67%, 89%, dan 97%. Oleh karena itu, perlu ada upaya untuk meningkatkan pengolahan Fly Ash guna mengurangi dampak limbah tersebut terhadap lingkungan.

Pemanfaatan Fly Ash sebagai bahan tambahan dalam produksi beton berongga merupakan solusi efektif untuk mengurangi jumlah Fly Ash. Fly Ash dapat menggantikan sebagian semen dalam campuran beton berongga, menghasilkan beton yang lebih kuat dengan porositas yang efektif [6]. Penelitian ini mencakup efek pemanfaatan Fly Ash terhadap kualitas beton berongga, termasuk porositas,

laju perkolasasi, dan kuat tekan. Porositas mempengaruhi kekuatan tekan beton, di mana semakin tinggi porositas, semakin rendah kuat tekannya. Pengujian laju perkolasasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton berongga mengalirkan air, sedangkan kuat tekan diuji untuk menentukan kekuatan struktur beton. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan beton berongga sebagai bahan konstruksi ramah lingkungan, khususnya untuk aplikasi pada lahan parkir.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi eksperimental yang bertujuan untuk mengetahui efek *Fly Ash* ketika digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen. Penelitian dilakukan dengan menggunakan pendekatan data kuantitatif dari hasil data pengujian. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bahan Bangunan, Departemen Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta. Dalam penelitian ini, beberapa sampel digunakan dengan perbedaan variasi komposisi campuran untuk beton berongga yang dimodifikasi dari *mix design* beton berkekuatan tinggi atau *High Strength Concrete* (HSC). Dengan menggunakan *Fly Ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen dengan 5 variasi yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, Pengujian dilakukan setelah periode curing selama 28 hari. Benda uji menggunakan ukuran dan komposisi agregat kasar, jenis semen, komposisi FAS, metode pembuatan sampel uji, metode perawatan / curing digunakan sebagai variabel kontrol. Nilai porositas, laju pekolasi, dan kuat tekan beton berongga merupakan variabel terikat. Sedangkan untuk variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi penambahan persentase *Fly Ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen. Bahan atau material yang digunakan dalam penelitian uji beton berongga melibatkan komponen-komponen khusus yang mendukung karakteristik pori dalam beton. Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian beton berongga adalah semen *Portland* tipe 1 (OPC), pasir alami yang berasal dari Merapi DIY, agregat kasar andesit yang bersal dari Clereng Kulon Progo, *fly ash* tipe F yang berasal dari pembakaran PLTU, *superplasticizer* tipe F bermerek dagang Sikament NN dan air yang digunakan tidak mengandung zat organic maupun kimia. Penelitian ini, terdapat delapan langkah utama yang dilaksanakan. Tahapan ini disajikan dalam bagan alur yang terdapat pada Gambar 1.

**Gambar 1.** Bagan alir penelitian

Sampel uji yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, yang akan digunakan untuk menguji porositas, laju perkolasi, dan kuat tekan. Pada Tabel 1 ditunjukkan benda uji Setiap persentase penggunaan *Fly Ash* terdiri dari 5 benda uji.

Tabel 1. Sampel Benda Uji *Porous Concrete*.

No	Penggunaan <i>Fly Ash</i> (%)	Kode	Jumlah
1	0	S00	15
2	5	S05	15
3	10	S10	15
4	15	S15	15
5	20	S20	15
Jumlah Total			75

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Mix Design

Perencanaan *mix design* pada penelitian ini mengacu pada *mix design* beton berkekuatan tinggi atau *High Strength Concrete* (HSC) dengan metode *metha/aitchin* [2]. Untuk meningkatkan sifat mekanik beton, sangat disarankan untuk menggunakan *superplasticizer* [5]. Dengan penggunaan *superplasticizer* pada dosis tertentu, nilai slump dapat meningkat hingga 50%. Proporsi material disajikan dalam satuan per m³.

Tabel 2. Proporsi Material per 1 m³

No	Pasir (kg)	Agregat Kasar (kg)	Semen (kg)	Fly Ash (kg)	Air (kg)	Superplasticizer (kg)
S00	72,89	1384,25	565	0	162,72	12,3
S05	72,89	1384,25	537	28,25	154,58	11,7
S10	72,89	1384,25	509	56,50	146,45	11,1
S15	72,89	1384,25	480	84,75	138,31	10,5
S20	72,89	1384,25	452	113	130,18	9,9

Perhitungan proporsi material ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$W/C = -0,0076 fc28 + 0,9082 \quad (1)$$

$$m = 6,432 w/c + 1,8704 \quad (2)$$

$$cem = -121,1m + 972,09 \quad (3)$$

dimana *w/c* adalah faktor air semen, *m* adalah agregat, dan *cem* adalah semen.

3.2. Pengujian Pasir

Pengujian dilakukan pada pasir alami berasal dari Kaliurang, Sleman Progo, DIY, Indonesia. Untuk memastikan konsistensi hasil pengujian agregat, maka pengujian dilakukan sebanyak 3 kali dan diambil nilai rata-rata dari pengujian tersebut. Tabel 2 menunjukkan nilai rerata hasil pengujian.

Table 3. Pengujian Pasir

No	Pengujian	Rerata	Satuan
1.	<i>Fines Modulus</i>	3,37	-
2.	Berat Jenis SSD	2,71	-
3.	Penyerapan Air	2,92	%
4.	Kadar Air Alami	0,46	%
5.	Kadar Air SSD	2,79	%
6.	Kadar Lumpur	0,21	%
7.	Bobot Isi Padat	1752,8	kg/m ³
8.	Bobot Isi Gembur	1591,8	kg/m ³

3.3. Pengujian Agregat Kasar

Pengujian dilakukan pada kerikil pecah berjenis andesit yang berasal dari Clereng, Kulon Progo, DIY, Indonesia. Untuk memastikan konsistensi hasil pengujian agregat, maka pengujian dilakukan sebanyak 3 kali dan diambil nilai rata-rata dari pengujian tersebut. Tabel 3 menunjukkan nilai rerata hasil pengujian. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, diperoleh agregat kasar yang digunakan sebagai bahan penyusun beton pori masuk ke dalam daerah gradasi nomor 1 termasuk dalam kelas agregat kasar.

Table 4. Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Pengujian	Rerata	Satuan
1.	Fines Modulus	7,5	-
2.	Berat Jenis SSD	2,71	-
3.	Penyerapan Air	1,61	%
4.	Kadar Air Alami	0,81	%
5.	Kadar Air SSD	2,35	%
6.	Kadar Lumpur	0,51	%
7.	Bobot Isi Padat	1640,0	kg/m ³
8.	Bobot Isi Gembur	1453,3	kg/m ³

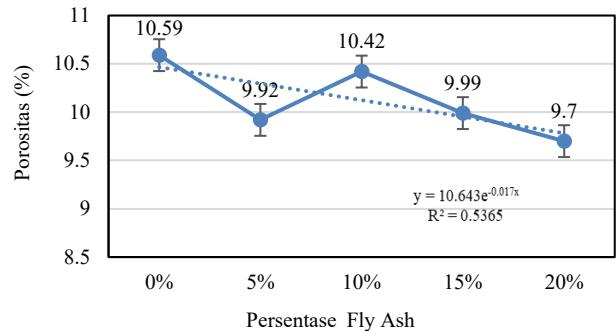
3.3. Pengujian Porositas

Pengujian nilai porositas dilakukan dengan membandingkan berat nominal dengan berat dalam air. Pengujian ini dilakukan untuk menentukan besar volume poros yang digunakan untuk perhitungan presentase porositas beton berongga. Untuk mengetahui porositas beton, persamaan yang dapat digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Porositas} = \frac{C - A}{C - D} \times 100\% \quad (4)$$

dimana A adalah berat kering oven (kg), C adalah berat keadaan jenuh (kg), dan D adalah berat dalam air (kg).

Dari total 25 benda uji penelitian berumur 28 hari yang dilakukan pengujian terhadap nilai porositas beton berongga dengan variasi menggunakan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen memiliki nilai berbeda-beda. Nilai rata-rata pengujian porositas beton berongga dengan variasi menggunakan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen yang terdapat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Pengaruh Fly Ash Pada Beton Berongga Terhadap Nilai Porositas

Pada Gambar 2, terlihat bahwa beton berongga dengan variasi presentase *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen memiliki porositas paling tertinggi 10,59%. Penambahan presentase *Fly Ash* membuat penurunan nilai porositas beton berongga. Hasil dari uji porositas beton berongga dengan presentase *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% masing-masing adalah 10,59%, 9,92%, 10,42%, 9,99%, dan 9,7%.

Porositas pada beton berongga berkaitan dengan jumlah rongga di dalamnya, yang terbentuk dari desain campuran yang tidak mengisi seluruh volume. Penambahan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen, dengan presentase pasir 10%, dalam penelitian oleh [8] menghasilkan nilai porositas sebesar 10,07%, menunjukkan penurunan porositas. Hal ini disebabkan oleh sifat *Fly Ash* yang memiliki senyawa silikon dioksida, aluminium oksida, dan ferum oksida (SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3) yang meningkatkan *workability* dan kepadatan beton, sehingga mengurangi porositas.

3.4. Pengujian Laju Perkolasi

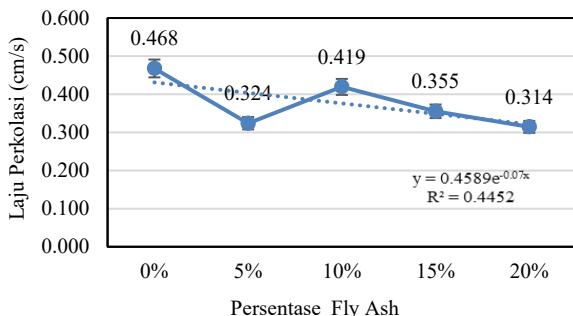
Pengujian laju perkolasi mengikuti metode *Falling Head* yang sesuai dengan ACI 522R-10. Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini dimodifikasi memanfaatkan bahan-bahan yang mudah ditemukan di sekitar. Pengujian dilakukan 3 kali, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Data yang sudah didapatkan dari pengujian laju perkolasi benda uji tersebut kemudian dihitung menggunakan persamaan yang dapat digunakan adalah sebagai berikut:

$$K = \frac{A_1 l}{A_1 t} \log \frac{h_2}{h_1} \quad (5)$$

dimana K adalah laju perkolasi (cm/s), A_1 adalah luas permukaan beton (cm²), A_2 adalah luas tabung (cm²), l adalah tinggi beton (cm), t adalah waktu (detik), h_1 adalah

tinggi awal muka air (cm), dan h_2 adalah tinggi akhir muka air (cm).

Nilai laju perkolasai beton berongga dengan variasi menggunakan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen memiliki nilai yang berbeda-beda. Berikut adalah nilai rata-rata pengujian laju perkolasai beton berongga dengan variasi menggunakan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen yang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Pengaruh Fly Ash Pada Beton Berongga Terhadap Nilai Laju Perkolasi

Pada Gambar 3, terlihat bahwa beton berongga dengan variasi presentase *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen memiliki nilai laju perkolasai paing tertinggi 0,314 cm/s. Penambahan presentase *Fly Ash* membuat penurunan nilai laju perkolasai beton berongga. Hasil dari uji laju perkolasai beton berongga dengan presentase *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% masing-masing adalah 0,468 cm/s, 0,324 cm/s, 0,419 cm/s, 0,355 cm/s, 0,314 cm/s.

Nilai laju perkolasai beton berongga sangat dipengaruhi oleh tingkat porositasnya. Rongga pada beton berfungsi sebagai jalur untuk air mengalir melalui struktur beton. ACI 522R-10 menyatakan bahwa semakin tinggi porositas pada beton berongga, semakin baik nilai laju perkolasinya. Namun, untuk mencapai laju perkolasai yang optimal, perlu diperhatikan karakteristik beton berongga agar kuat tekan tetap terjaga. Penambahan *Fly Ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen dengan presentase pasir 10% dalam penelitian sebelumnya menyebabkan penurunan nilai porositas beton berongga, yang diikuti dengan menurunnya nilai laju perkolasai. Penurunan nilai laju perkolasai juga tergantung pada kepadatan permukaan dari beton berongga. Proses pengisian campuran beton segar dalam cetakan juga berpengaruh terhadap nilai laju perkolasai beton berongga.

3.5. Pengujian Kuat Tekan

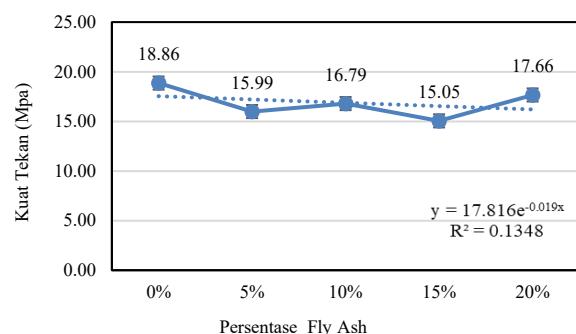
Kuat tekan benda uji kuat tekan benda uji beton merujuk pada kemampuan beton untuk menahan tekanan atau gaya

aksial sebelum mengalami deformasi atau retak. Perhitungan kuat tekan dapat dilihat pada Persamaan 6

$$\text{Kuat tekan beton} = \frac{P}{A} \quad (6)$$

dimana kuat tekan beton dinyatakan dalam N/mm² atau Mpa, P adalah gaya tekan aksial (N), A adalah luas penampang melintang beton (mm²).

Nilai kuat tekan beton berongga variasi menggunakan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen memiliki nilai yang berbeda-beda. Berikut adalah nilai rata-rata pengujian kuat tekan beton berongga variasi menggunakan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen yang dapat dilihat pada grafik dibawah ini:



Gambar 4. Grafik Pengaruh Fly Ash Beton Berongga Terhadap Nilai Kuat Tekan Umur 28 Hari

Berdasarkan grafik pada Gambar 4 terlihat bahwa beton berongga dengan variasi presentase *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen mencapai kuat tekan tertinggi 17,66 MPa. Penambahan presentase *Fly Ash* membuat penurunan nilai kuat tekan beton berongga. Hasil uji kuat tekan beton berongga presentase *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% masing-masing adalah 18,86 MPa, 15,99 MPa, 16,79 MPa, 15,05 MPa, dan 17,66 MPa.

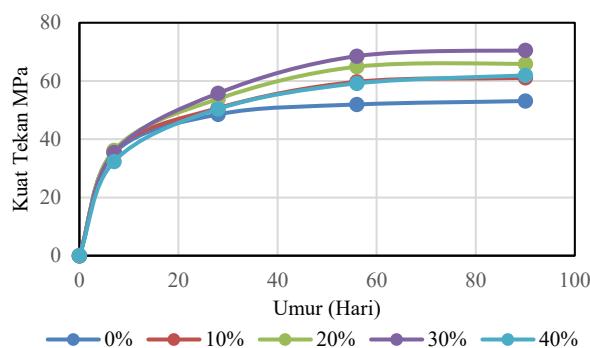
Nilai kuat tekan pada beton berongga sangat dipengaruhi oleh tingkat porositas dan laju perkolasai. Semakin padat beton berongga, semakin tinggi nilai kuat tekannya, dan sebaliknya, semakin rendah kepadatan beton berongga, semakin rendah nilai kuat tekannya. Penggunaan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen dengan persentase pasir 10% menyebabkan penurunan kepadatan pada beton berongga.

Penurunan kepadatan ini diikuti dengan penurunan nilai kuat tekan. Hal ini karena penggunaan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen membuat beton berongga semakin ringan dengan kepadatan yang tinggi, berkat senyawa silikon dioksida, aluminium oksida, dan ferum oksida (SiO_2 , AL_2O_3 , dan Fe_2O_3) dalam *Fly Ash*.

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen meningkatkan kepadatan beton berongga, tetapi tidak secara signifikan meningkatkan nilai kuat tekannya. Fenomena ini dapat dijelaskan lebih lanjut dalam penelitian.

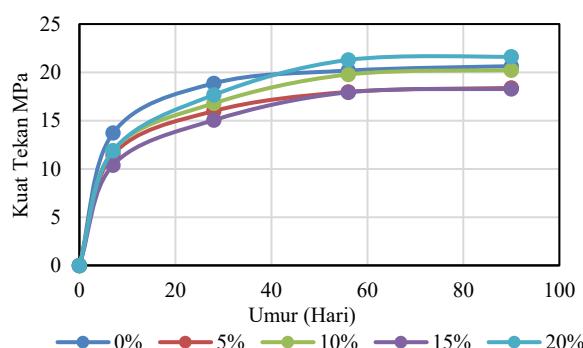
3.6. Prediksi Hasil Pengujian Sesuai Umur

Beberapa faktor mempengaruhi kuat tekan beton berongga dengan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen, salah satunya adalah umur pengujian. Penelitian oleh [7] menunjukkan bahwa penggunaan *Fly Ash* meningkatkan kekuatan beton dengan campuran semen 350 kg/m³ dan FAS 0,4 seiring dengan umur pengujian yang lebih panjang.



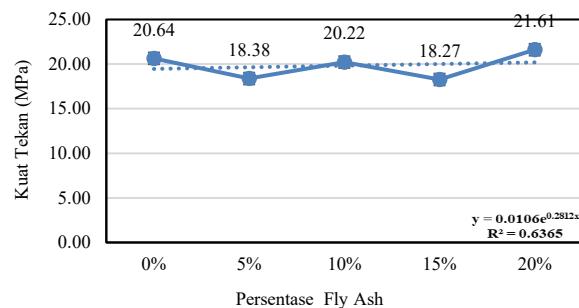
Gambar 5. Grafik Perbandingan Kuat Tekan dan Umur [7]

Berdasarkan grafik, rasio kuat tekan beton berongga dengan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen dapat ditinjau lebih lanjut melalui konversi nilai kuat tekan terhadap umur pengujian yang lebih lama. Konversi ini dilakukan berdasarkan studi oleh [7] dengan hasil konversi ditampilkan pada berikut:



Gambar 6. Hasil Konversi Kuat Tekan Berdasarkan Umur [7]

Hasil konversi menunjukkan bahwa nilai kuat tekan beton berongga meningkat dan stabil pada umur 90 hari. Beton berongga dengan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen mengalami peningkatan kuat tekan yang signifikan, seperti terlihat pada Gambar 58.



Gambar 7. Grafik Hasil Prediksi Beton Berongga Umur 90 Hari

Nilai kuat tekan beton berongga meningkat setelah konversi pada umur 90 hari, meskipun tidak signifikan. Variasi 20% *Fly Ash* menghasilkan nilai tertinggi 21,61 MPa, sementara variasi 0%, 5%, 10%, dan 15% masing-masing mencapai 20,64 MPa, 18,38 MPa, 20,22 MPa, dan 18,27 MPa. Berdasarkan hasil pengujian [7] konversi umur pengujian menunjukkan peningkatan kuat tekan pada umur 90 hari. Variasi 0% *Fly Ash* diprediksi mencapai 20,64 MPa, dan variasi 20% *Fly Ash* mencapai 21,61 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen meningkatkan kuat tekan beton berongga pada umur 90 hari, menjadikannya optimal untuk aplikasi lahan parkir yang ekonomis.

Berdasarkan Gambar 7, nilai kuat tekan beton berongga menunjukkan peningkatan yang tidak konsisten. Hal ini disebabkan oleh berbagai faktor, seperti variasi komposisi campuran beton dan kualitas agregat yang digunakan, serta ketidakstabilan selama pembuatan dan pencetakan. Perawatan yang tidak memadai selama curing, seperti kekurangan air atau paparan sinar matahari langsung, juga dapat menurunkan kualitas beton. Oleh karena itu, kontrol yang ketat terhadap variabel dalam proses pembuatan dan curing sangat penting [3]. Selain itu, penggunaan alat pengujian yang tidak memadai atau perbedaan kecepatan dalam proses pengujian dapat menyebabkan hasil yang bervariasi. Alat yang tidak terkalibrasi dengan baik atau tidak memenuhi standar dapat menghasilkan pembacaan yang tidak akurat. Untuk memperoleh hasil yang konsisten, penting untuk menggunakan alat pengujian yang tepat dan mengikuti prosedur pengujian sesuai dengan SNI 032487 2002.

3.7. Hasil Komparasi Penelitian dengan Penelitian Sebelumnya

Perbandingan penelitian ini dengan [7] pada variasi penggunaan *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen. Penelitian Waehidin (2024) menggunakan campuran high strength concrete (HSC) dengan variasi pasir 5% dan 10%. Hasilnya menunjukkan nilai terbaik pada 5% pasir dengan

porositas 9,73%, laju perkolasii 0,1814 cm/s, dan kuat tekan 23,39 MPa, serta pada 10% pasir dengan porositas 10,07%, laju perkolasii 0,1775 cm/s, dan kuat tekan 20,13 MPa.

Penelitian ini, menggunakan 10% pasir dengan variasi *Fly Ash* 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, memperoleh hasil terbaik pada 20% *Fly Ash* dengan porositas 9,7%, laju perkolasii 0,314 cm/s, dan kuat tekan 17,66 MPa. Nilai porositas, laju perkolasii, dan kuat tekan pada penelitian ini menurun dibandingkan dengan Waehidin (2024) karena penggunaan *Fly Ash* menggantikan *silica fume*. Meskipun demikian, hasil penelitian ini tetap aplikatif untuk perkerasan pejalan kaki dan lahan parkir serta lebih ekonomis karena memanfaatkan *Fly Ash* yang lebih murah daripada *silica fume*.

3.8. Beton Berongga Pada Perkerasan Lahan Parkir Kendaraan Umum

Belum ada standar khusus untuk kuat tekan beton berongga pada lahan parkir di Indonesia, sehingga peneliti merujuk pada standar *paving block* SNI 03-0691-1996, yang mensyaratkan kuat tekan antara 17-20 MPa. Hasil eksperimen menunjukkan beton berongga dengan *Fly Ash* pada berbagai persentase (0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%) memiliki kuat tekan rerata masing-masing sebesar 18,86 MPa, 15,99 MPa, 16,79 MPa, 15,05 MPa, dan 17,66 MPa.

Untuk mengoptimalkan beton berongga, penting memperhatikan nilai porositas dan laju perkolasii. Nilai rerata porositas adalah 10,59%, 9,92%, 10,42%, 9,99%, dan 9,7%, sementara laju perkolasii adalah 0,468 cm/s, 0,324 cm/s, 0,419 cm/s, 0,355 cm/s, dan 0,314 cm/s. Persentase *Fly Ash* 20% menunjukkan nilai kuat tekan sebesar 17,66 MPa, yang memenuhi syarat SNI 03-0691-1996 untuk lahan parkir, serta porositas 9,7% dan laju perkolasii 0,314 cm/s. Meskipun porositas 20% *Fly Ash* masih di bawah standar ACI 522R-10 (15%), laju perkolasinya cukup tinggi. Keseimbangan antara porositas, laju perkolasii, dan kuat tekan penting untuk optimalisasi beton berongga dalam aplikasi lahan parkir.

4. Simpulan

Nilai porositas yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai kuat tekan. Rerata kuat tekan *porous concrete* yang dihasilkan pada setiap variasi berada di atas 15 MPa. Laju Perkolasii yang dihasilkan cenderung menurun di setiap peningkatan penggunaan *Fly Ash*. Porositas yang dihasilkan pada setiap variasi cenderung menurun pada setiap peningkatan penggunaan *Fly Ash*. Prediksi pengujian kuat tekan beton berumur 90 hari dengan *Fly Ash* didapatkan mengalami peningkatan.

Daftar Rujukan

- [1] Amran, Y. (2016). Pemanfaatan limbah plastik untuk bahan tambahan pembuatan *paving block* sebagai alternatif perkerasan pada lahan parkir di Universitas Muhammadiyah Metro. TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil, 4 (2).
- [2] Alves, M. F., Cremonini, R. A., & Dal Molin, D. C. C. (2004). A comparison of mix proportioning methods for high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 613-621.
- [3] Badan Standarisasi Nasional. (1996). *SNI-03- 0691-1996 tentang Bata Beton (Paving Block)*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- [4] Arkis, Z. (2020). Pengaruh metode perawatan beton terhadap kuat tekan beton normal. *Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Padang*, 7 (2), 5-5
- [5] Defita, N. R., Zaim, R. L., Rachrin, R. D., Umar, I., Barlian, E., Erianjoni, E., & Putra, A. (2022). Permasalahan Banjir: Tinjauan Literatur dalam Perspektif Kerusakan Lingkungan dan Upaya Penanggulangannya. *Jurnal Kependudukan dan Pembangunan Lingkungan*, 3(3), 204-216.
- [6] Kusnadi & Sulistyorini, D. (2011). Pengaruh Penambahan *Superplastisizer* terhadap Campuran Beton Ringan yang menggunakan Styrofoam. INERSIA: *Informasi dan Eksposisi Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 7(2), 124-140
- [7] Prasetyo, Y. E., & Widodo, S. (2015). Pengaruh Cara Perawatan Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Lentur *High Early Strength Fiber Reinforced Concrete*. In 46 INERSIA: Vol. XI No.I.
- [8] Rao, M. K., & Ch, N. S. K. (2022, March). *Evaluation of Strength Properties of the Concrete Prepared from Class F Fly Ash*. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 982, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- [9] Waehidin. (2024). Uji Kuat Tekan dan Kuat Lentur Pervious Concrete dengan Reduksi Kandungan Pasir pada Campuran High Strength Concrete.
- [10] Widodo, S. (2015). Kajian Sifat Mekanik Beton Ringan Dengan Penggunaan *Polystyrene* Sebagai Bahan Substitusi Agregat Halus. In 46 INERSIA: Vol. XI No.I.