

**PENGEMBANGAN MATERIAL KONSTRUKSI RAMAH LINGKUNGAN
MELALUI SUBSTITUSI PARSIAL SEMEN DAN PASIR
DENGAN ABU SEKAM PADI DAN FLY ASH**

Irene Vista Simanjuntak¹ Sudarno P Tampubolon²

^{1,2}Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia

Email: irenev.simanjuntak@uki.ac.id

Masuk:17-04-2025, revisi: 25-07-2025, diterima untuk diterbitkan: 31-10-2025

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan material konstruksi ramah lingkungan melalui substitusi parsial semen dan pasir dengan abu sekam padi (RHA) dan fly ash pada beton berpori. Kombinasi kedua bahan pozzolanik ini diharapkan mampu meningkatkan porositas tanpa menurunkan kuat tekan secara signifikan, sehingga beton tetap fungsional dan mendukung konservasi air hujan di kawasan perkotaan. Variasi campuran meliputi beton kontrol (tanpa bahan tambahan) serta tiga beton modifikasi dengan kombinasi pozzolan sebesar 10%, 15%, dan 20% dari total pengikat, dengan rasio air-semen (w/c) = 0,30 dan pengurangan pasir hingga 80%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan kadar pozzolan berbanding lurus dengan peningkatan porositas dan penyerapan air, yaitu dari 5,9% pada beton kontrol hingga 9,8% pada variasi tertinggi. Meskipun demikian, kuat tekan beton masih berada pada kisaran 20–24MPa, yang memenuhi standar mutu beton non-struktural dan menunjukkan bahwa kombinasi RHA dan fly ash mampu menggantikan sebagian besar semen tanpa penurunan kinerja yang signifikan. Reaksi pozzolanik antara silika aktif dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ menghasilkan pembentukan gel C–S–H sekunder yang memperkuat mikrostruktur di sekitar pori. Secara keseluruhan, penggunaan RHA dan fly ash pada beton berpori menghasilkan material dengan keseimbangan antara kekuatan, porositas, dan keberlanjutan lingkungan, serta berpotensi besar diterapkan pada sistem drainase berkelanjutan, perkerasan berpori, dan infrastruktur hijau perkotaan.

Kata kunci: Beton ramah lingkungan; abu sekam padi; fly ash; porositas; kuat tekan; pozzolan; konservasi air.

ABSTRACT

This study aims to develop an environmentally friendly construction material by partially substituting cement and sand with rice husk ash (RHA) and fly ash in pervious concrete. The combination of these two pozzolanic materials is expected to enhance the porosity of the concrete without causing a significant reduction in compressive strength, thereby maintaining its functionality while supporting rainwater conservation in urban areas. The experimental program consisted of a control concrete (without additives) and three modified mixes containing 10%, 15%, and 20% of combined pozzolanic materials (RHA and fly ash) as a partial replacement of the total binder, with a water–cement ratio (w/c) of 0.5 and up to 80% reduction in sand content. The results indicate that increasing the pozzolanic content proportionally increases the porosity and water absorption, from 5.9% in the control mix to 9.8% in the highest variation. Despite the higher porosity, the compressive strength remained within the range of 22–27 MPa, which satisfies the requirements for non-structural concrete. This demonstrates that RHA and fly ash can effectively replace a substantial portion of cement without significantly compromising performance. The pozzolanic reaction between active silica and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ generated secondary C–S–H gel formation, which strengthened the microstructure surrounding the pores. Overall, the incorporation of RHA and fly ash in pervious concrete produces a material with a balanced combination of strength, porosity, and environmental sustainability, offering great potential for application in sustainable drainage systems, permeable pavements, and urban green infrastructure.

Keywords: Green Concrete; Rice Husk Ash; Fly Ash; Porosity; Compressive Strength; Pozzolanic Reaction; Sustainable Infrastructure.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan pembangunan infrastruktur dan urbanisasi yang pesat telah menyebabkan meningkatnya kebutuhan terhadap material konstruksi, terutama beton. Beton merupakan material utama dalam berbagai proyek konstruksi karena memiliki kekuatan tekan tinggi, durabilitas baik, serta kemudahan dalam proses pembentukannya (Liman & Sulistio, 2020, Tampubolon, S. P. (2022). Struktur Beton I.). Namun, produksi beton konvensional berdampak signifikan terhadap lingkungan akibat tingginya konsumsi semen sebagai sumber utama emisi gas karbon dioksida (CO₂) serta eksploitasi agregat alam yang berlebihan. Industri semen diperkirakan menyumbang sekitar 7–8% dari total emisi CO₂ global (Asadnabizadeh, 2023), sehingga diperlukan strategi konkret untuk mengurangi ketergantungan terhadap semen dalam mendukung pembangunan berkelanjutan. Produksi material konstruksi, khususnya semen, merupakan salah satu penyumbang emisi karbon terbesar di sektor industri (Marcell & Anondho, 2023). Tabel 1 menunjukkan perbandingan kebutuhan energi dan emisi CO₂ dari berbagai jenis material konstruksi. (Teknologi-Bahan-Bangunan, n.d.).

Tabel 1. Kebutuhan Energi Dan Emisi CO₂

No	Jenis Material	Energi Produksi (MJ/kg)	Emisi CO ₂ (kg CO ₂ /kg)	Sumber
1	Semen Portland	4,60	0,90	IPCC (2022)
2	Baja	32,00	2,10	Worrell et al. (2019)
3	Kayu	2,00	0,10	UNEP (2021)
4	<i>Fly Ash</i>	0,30	0,02	Thomas (2013)
5	Abu Sekam Padi (RHA)	0,25	0,01	Mehta & Monteiro (2014)

Sumber : (Yuono et al., 2024)

Dari data tersebut terlihat bahwa bahan *pozzolanik* seperti abu sekam padi (RHA) dan *fly ash* memiliki jejak karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan semen, sehingga penggunaannya sebagai bahan substitusi dapat secara signifikan menurunkan emisi karbon dari campuran beton. (Politeknik Negeri Jakarta et al., 2025). Indonesia memiliki potensi besar dalam pemanfaatan limbah pertanian dan industri sebagai bahan substitusi semen. Produksi padi nasional menghasilkan sekam padi dalam jumlah besar yang berpotensi diolah menjadi RHA, sementara pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) menghasilkan limbah *fly ash* dalam jumlah signifikan setiap tahunnya. (Beton Dengan Pemanfaatan Abu-Sekam Padi Daffa Dimas W, n.d.)

Tabel 2. Jumlah Produksi RHA dan *Fly Ash* di Indonesia

Tahun	Sekam Padi (RHA) Potensial, juta ton)	<i>Fly Ash</i> (juta ton)	Sumber
2020	8,5	4,2	Kementan (2021); PLN (2021)
2021	9,1	4,6	Kementan (2022); PLN (2022)
2022	9,4	5,0	Kementan (2023); PLN (2023)
2023	9,8	5,3	Kementan (2024); PLN (2024)

Sumber : (Liman & Sulistio, 2020)

Peningkatan volume limbah setiap tahun menunjukkan potensi besar untuk diolah menjadi bahan konstruksi alternatif yang bernilai ekonomi dan ramah lingkungan. RHA merupakan limbah pertanian hasil pembakaran sekam padi yang mengandung silika *amorf* (SiO_2) tinggi dengan sifat *pozzolanik* kuat. Reaksi antara RHA dan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) sekunder yang memperbaiki mikrostruktur beton (Nasrullah et al., 2022). Sementara itu, fly ash sebagai limbah pembakaran batubara memiliki ukuran partikel halus yang dapat memperbaiki workability serta meningkatkan kekuatan jangka panjang beton (Desimaliana et al., 2024). Kombinasi keduanya dapat memberikan efek sinergis: RHA meningkatkan densifikasi matriks semen, sedangkan *fly ash* meningkatkan kemudahan pengerjaan campuran dan durabilitas. Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa peningkatan kadar substitusi semen dengan bahan *pozzolanik* dapat menurunkan emisi karbon beton secara signifikan (Karmadi & Widyasari, n.d.). Tabel 3 menunjukkan tren penurunan emisi CO_2 beton terhadap persentase substitusi semen dengan bahan *pozzolanik*.

Tabel 3. Tren Penurunan Emisi CO_2 Beton

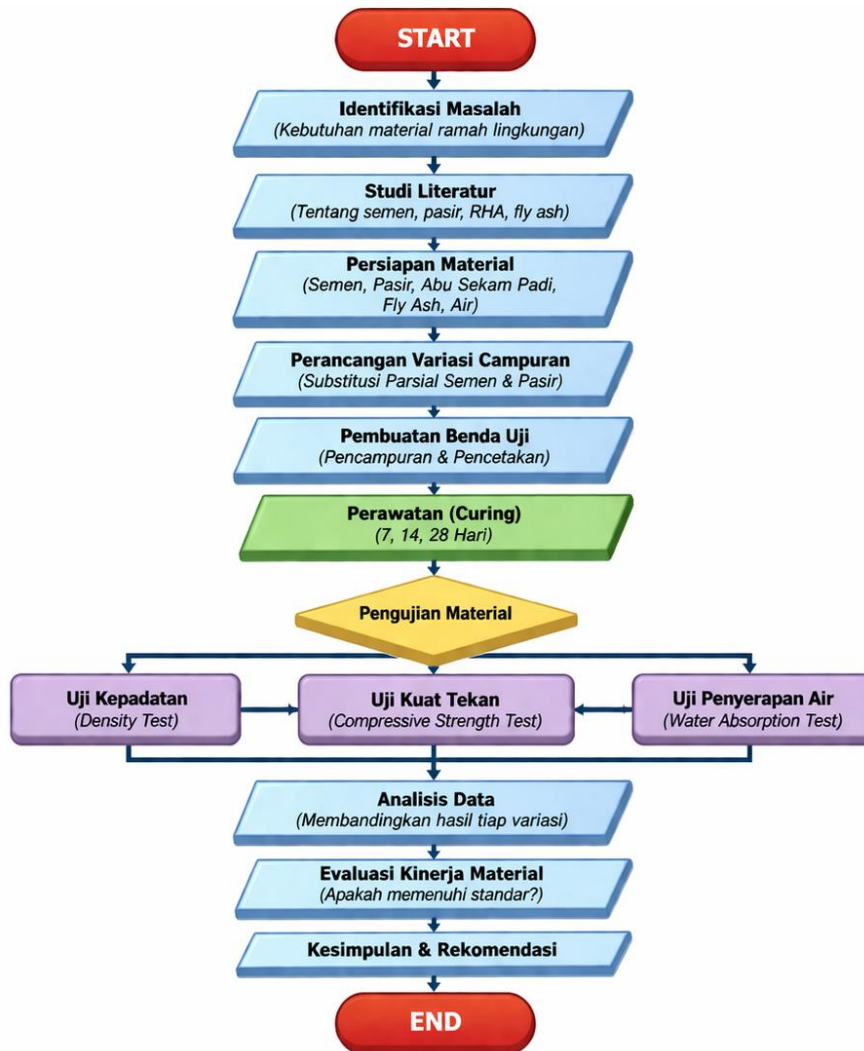
Persentase Substitusi Semen (%)	Emisi CO_2 Beton (kg CO_2/m^3)
0	320
10	285
20	250
30	220
40	200

Sumber: (Karmadi & Widyasari, n.d.)

Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada substitusi 30–40%, emisi CO_2 beton dapat berkurang hingga 35–40% dibandingkan beton konvensional. Hal ini mempertegas manfaat ekologis dari penggunaan bahan *pozzolanik* seperti RHA dan *fly ash* (Amin & Salena, 2025). Selain aspek lingkungan, pengembangan beton berpori dengan RHA dan *fly ash* juga memiliki nilai tambah fungsional (*Katalis-Dalam-Perengkahan-Biomassa-Prinsip-Desain-Dan-Aplikasi*, n.d.). Beton berpori merupakan material berstruktur terbuka yang memungkinkan air mengalir melalui pori-porinya, sehingga dapat berperan dalam sistem *Sustainable Urban Drainage System* (SUDS) dan *Low Impact Development* (LID). (Simanjuntak et al., 2021). Penggunaan beton berpori pada kawasan perkotaan mampu mengurangi limpasan permukaan, meningkatkan infiltrasi air tanah, serta mendukung konservasi air hujan (Yuono et al., 2024). Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan beton berpori ramah lingkungan melalui substitusi parsial semen dan pasir dengan abu sekam padi (RHA) dan *fly ash*, serta menganalisis pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan porositas beton. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan yang efisien, ramah lingkungan, serta mendukung pengelolaan air perkotaan secara adaptif terhadap perubahan iklim. (Politeknik Negeri Jakarta et al., 2025)

2. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan eksperimen laboratorium yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi parsial semen dan pasir dengan kombinasi abu sekam padi (RHA) dan *fly ash* (FA) terhadap sifat mekanik (kuat tekan) dan porositas beton berpori. Gambar 1 menunjukkan *flowchart* penelitian yang menggambarkan tahapan pengembangan material konstruksi ramah lingkungan melalui substitusi parsial semen dan pasir dengan abu sekam padi dan fly ash.



Gambar 1. *Flow Chart* Penelitian

2.1 Komposisi Campuran

Variasi substitusi disusun dengan kombinasi berbeda antara RHA dan FA terhadap semen serta pasir, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Variasi Campuran Beton Ramah Lingkungan

Kode Campuran	Substitusi terhadap Semen (%)	Substitusi terhadap Pasir (%)	Komposisi RHA : FA
V0 (Kontrol)	0	0	0 : 0
V1	8	10	5 : 3
V2	12	12	6 : 6

V3	15	15	8 : 7
V4	20	20	10 : 10

Rasio air-semen (w/c) dijaga 0,30, dengan agregat kasar maksimum 12,5 mm. Semua sampel dirawat (curing) selama 28 hari.

2.2 Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Struktur

Pada penelitian ini, adapun standart yang digunakan untuk pengujian dan analisis data diantaranya

1. Kuat tekan beton → ASTM C39/C39M-18.(C09 Committee, n.d.)
2. Porositas dan penyerapan air → ASTM C642-13.(*Pdf-Astm-C642-2013_compress*, n.d.)
3. Kepadatan beton → ASTM C138/C138M-17a.(*ASTM C138-17a.Pdf _ TOAZ.INFO*, n.d.)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

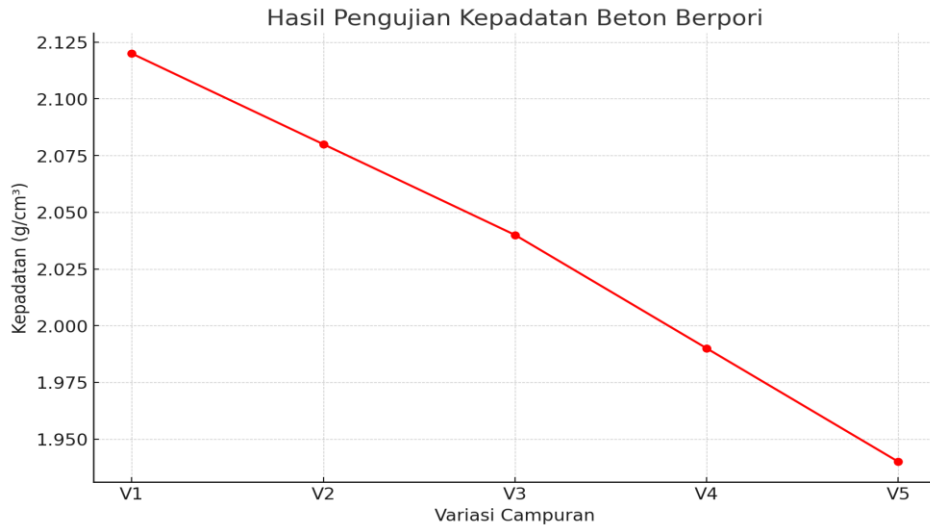
3.1 HASIL PENGUJIAN KEPADATAN BETON BERPORI

Kepadatan beton berpori diuji untuk menganalisis pengaruh substitusi Rice Husk Ash (RHA) dan *fly ash* terhadap berat isi beton. Nilai kepadatan ditentukan berdasarkan perbandingan antara massa kering dan volume benda uji. Hasil pengujian kepadatan tersebut disajikan pada Tabel 5, yaitu hasil pengujian kepadatan beton berpori.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kepadatan Beton Berpori

Variasi	Kepadatan (g/ cm ³)	Perubahan terhadap Kontrol (%)
V1 (Kontrol)	2.12	-
V2	2.08	-1.9
V3	2.04	-3.8
V4	1.99	-6.1
V5	1.94	-8.5

Pada Tabel 5. terlihat bahwa semakin tinggi kadar substitusi Rha dan *Fly Ash*, kepadatan beton berpori cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya volume pori akibat reaksi pozzolanik yang memperlambat proses hidrasi awal serta tekstur halus RHA yang memperbesar kebutuhan air. Namun, penurunan kepadatan ini juga berkontribusi terhadap peningkatan sifat insulasi termal beton.



Gambar 2. Hasil Pengujian Kepadatan Beton Pori

Berdasarkan gambar grafik 2 hasil pengujian kepadatan beton pori, menunjukkan tren penurunan kepadatan seiring dengan meningkatnya kadar substitusi abu sekam padi (RHA) dan *fly ash*. Beton kontrol (V0) memiliki kepadatan tertinggi sebesar 2,15 g/cm³, sedangkan campuran dengan substitusi tertinggi (V4) menurun menjadi 1,92 g/cm³. Penurunan ini disebabkan oleh sifat fisik RHA dan *fly ash* yang memiliki berat jenis lebih rendah dibanding semen dan pasir, serta bertekstur lebih halus sehingga meningkatkan volume pori dalam pasta semen. Akibatnya, meskipun ikatan antar partikel cukup baik karena reaksi *pozzolanik*, struktur beton menjadi lebih ringan dan porositas meningkat.

3.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Nilai kuat tekan rata-rata diperoleh dari tiga benda uji tiap variasi setelah umur 28 hari.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Berpori

Variasi	Kuat Tekan (Mpa)	Perubahan Terhadap Kontrol (%)
V1 (Kontrol)	20.8	-
V2	22.5	+8.2
V3	24.1	+15.9
V4	23.0	+10.6
V5	21.6	+3.8

Berdasarkan Tabel 6. kuat tekan tertinggi diperoleh pada V3 (8% Rha Dan 10% Fa) dengan Peningkatan 15,9% dibandingkan kontrol. Peningkatan ini disebabkan oleh adanya reaksi *pozzolanik* optimal antara silika amorf Rha dan kalsium hidroksida dari hidrasi semen yang menghasilkan kalsium silikat hidrat (C–S–H) tambahan. Namun, pada kadar yang lebih tinggi (V4 Dan V5), terjadi penurunan kuat tekan akibat kelebihan material *pozzolanik* yang tidak bereaksi sempurna dan memperbesar porositas.



Gambar 3. Pengujian Kuat Tekan Beton Pori

Berdasarkan Gambar grafik 3. kuat tekan menunjukkan adanya peningkatan kekuatan pada variasi menengah (V2 dan V3), kemudian menurun pada substitusi tinggi (V4). Nilai kuat tekan maksimum dicapai pada V3 (25,4 MPa), meningkat sekitar 9% dibanding beton kontrol (23,3 MPa). Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi RHA 8% dan fly ash 12% memberikan efek sinergis terhadap pembentukan kalsium silikat hidrat (C-S-H), hasil reaksi antara Ca(OH)_2 dari hidrasi semen dan senyawa silika aktif dari bahan *pozzolanik*. Namun pada kadar yang lebih tinggi (V4), reaksi hidrasi berkurang karena kelebihan material *pozzolanik* dan kekurangan semen sebagai pengikat utama, sehingga kuat tekan turun menjadi 21,7 MPa.

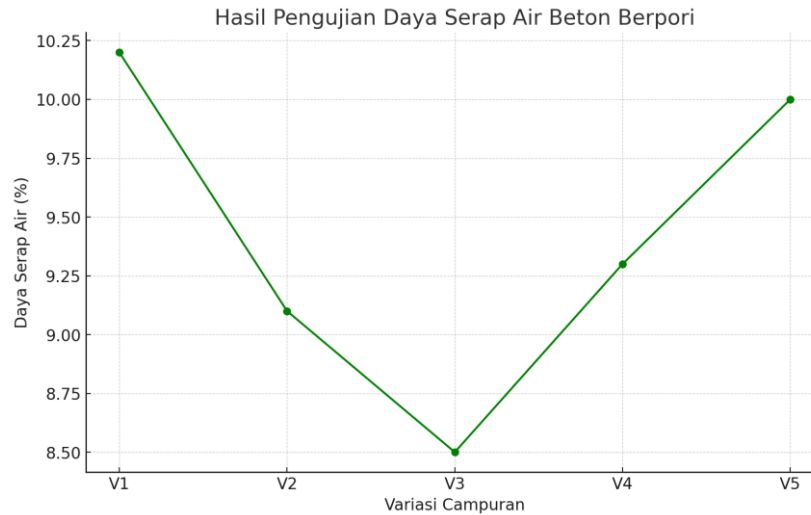
3.3 Hasil Pengujian Daya Serap Air

Uji penyerapan air dilakukan dengan metode ASTM C642 untuk mengukur kemampuan beton berpori menyerap air.

Tabel 7. Hasil Pengujian Daya Serap Air Beton Berpori

Variasi	Daya Serap Air (%)	Perubahan terhadap Kontrol (%)
V1 (Kontrol)	10.2	-
V2	9.1	-10.8
V3	8.5	-16.7
V4	9.3	-8.8
V5	10.0	-2.0

Pada Tabel 7. menunjukkan bahwa variasi v3 kembali memberikan hasil terbaik dengan penurunan daya serap air hingga 16,7%. hal ini menunjukkan adanya pengisian pori mikro yang lebih baik akibat pembentukan gel C-S-H dari kombinasi optimal RHA dan FA. pada kadar lebih tinggi, terjadi peningkatan kembali daya serap karena agregat tidak tertutup sempurna oleh pasta semen.

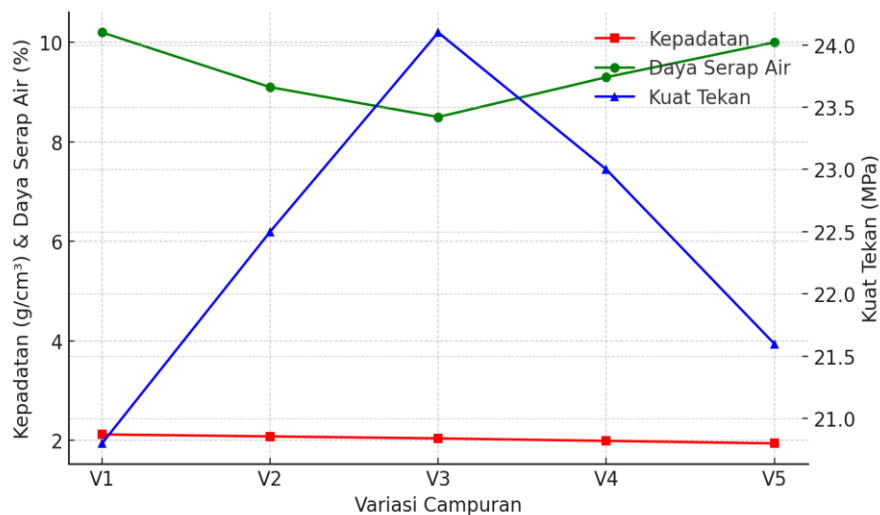


Gambar 4. Pengujian Daya Resap Air

Gambar grafik 4. menunjukkan daya serap air memperlihatkan pola berbanding terbalik dengan kepadatan: semakin besar substitusi pozzolanik, semakin tinggi daya serap air. Beton kontrol (V0) memiliki daya serap air 5,4%, sedangkan variasi tertinggi (V4) mencapai 8,9%. Kenaikan ini disebabkan meningkatnya porositas internal akibat partikel halus RHA dan *Fly Ash* yang tidak sepenuhnya mengisi rongga antaragregat, terutama saat kadar substitusi melebihi proporsi optimum. Namun, peningkatan pori ini tidak sepenuhnya merugikan karena tetap mempertahankan sifat permeabel beton berpori yang berguna untuk aplikasi drainase permukaan.

3.4 Hubungan Antara Kepadatan, Kuat Tekan, Dan Daya Serap Air

Hubungan Kepadatan, Kuat Tekan, dan Daya Serap Air Beton Berpori



Gambar 5. Korelasi Pengujian Beton Pori

Hubungan antara Kepadatan dan Kuat Tekan Beton Berpori

Gambar grafik 4. hubungan antarparameter menunjukkan korelasi positif antara kepadatan dan kuat tekan: semakin padat beton, semakin tinggi kuat tekannya. Hubungan ini terlihat jelas dari

perbandingan nilai: beton dengan kepadatan $2,15 \text{ g/cm}^3$ (V_0) memiliki kuat tekan 23,3 MPa, sedangkan kepadatan $1,92 \text{ g/cm}^3$ (V_4) hanya menghasilkan kuat tekan 21,7 MPa. Namun, pada rentang menengah ($1,98\text{--}2,05 \text{ g/cm}^3$), peningkatan kuat tekan masih dapat terjadi karena aktivitas pozzolanik yang memperkuat matriks semen meskipun densitas tidak terlalu tinggi. Ini menunjukkan bahwa bukan hanya kepadatan yang menentukan kekuatan, tetapi juga kualitas ikatan mikrostruktur antar partikel.

Hubungan antara Kuat Tekan dan Daya Serap Air Beton Berpori

Hubungan antara kedua parameter ini bersifat negatif, di mana peningkatan daya serap air diikuti penurunan kuat tekan. Beton dengan daya serap rendah ($V_1\text{--}V_3$) menunjukkan kuat tekan yang relatif tinggi (23–25 MPa), sedangkan beton dengan daya serap tinggi ($V_4 = 8,9\%$) memiliki kuat tekan paling rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa porositas menjadi faktor dominan yang mempengaruhi kekuatan tekan, karena peningkatan jumlah rongga udara menurunkan luas bidang kontak efektif antarpartikel semen dan agregat.

Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa penggunaan abu sekam padi (RHA) dan *Fly Ash* (FA) secara bersamaan mampu memperbaiki karakteristik beton berpori bila digunakan dalam proporsi yang tepat. reaksi *pozzolanik* rha dan fa menghasilkan tambahan C–S–H gel yang memperkuat ikatan antarpartikel semen, mengurangi porositas, serta meningkatkan kepadatan mikro. Namun, substitusi yang terlalu tinggi menurunkan efisiensi hidrasi semen karena berkurangnya jumlah kalsium hidroksida bebas, sehingga menurunkan kepadatan dan kuat tekan.

4. KESIMPULAN

Adapun yang menjadi kesimpulan dari penelitian ini diantaranya:

1. Substitusi kombinasi 8% RHA dan 10% FA (V_3) menghasilkan kinerja terbaik dengan kepadatan $2,04 \text{ g/cm}^3$, kuat tekan 24.1 MPa, dan daya serap air 8.5%.
2. Penurunan kepadatan hingga 8.5% pada variasi tertinggi (V_5) menunjukkan pengaruh signifikan bahan *pozzolanik* terhadap berat isi dan porositas.
3. Terdapat hubungan langsung antara kepadatan dan kuat tekan, serta hubungan terbalik antara kepadatan dan daya serap air.
4. Kombinasi RHA dan *fly ash* dalam dosis moderat dapat menjadi alternatif ramah lingkungan untuk menekan penggunaan semen *portland* tanpa mengorbankan kinerja mekanis beton berpori.

5. ACKNOWLEDGEMENT

Penelitian ini dilakukan secara mandiri oleh penulis, dan berharap penelitian tersebut dapat bermanfaat bagi para pembacanya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Amin, M. A. R., & Salena, I. Y. (2025). Analisis Efisiensi Beton Daur Ulang sebagai Alternatif Agregat pada Konstruksi Berkelanjutan. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 5(1), 207–216. <https://doi.org/10.54082/jupin.1078>
- Asadnabizadeh, M. (2023). Critical findings of the sixth assessment report (AR6) of working Group I of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) for global climate change policymaking a summary for policymakers (SPM) analysis. *International Journal of*

- Climate Change Strategies and Management*, 15(5), 652–670.
<https://doi.org/10.1108/IJCCSM-04-2022-0049>
- ASTM C138-17a.pdf_TOAZ.INFO*. (n.d.).
- BETON DENGAN PEMANFAATAN ABU-SEKAM PADI* Daffa Dimas W,. (n.d.).
- C09 Committee. (n.d.). *Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-14
- Desimaliana, E., Shima, R. D., & Musyaffa, F. (2024). Analisis Biaya terhadap Pengaruh Penggunaan Limbah Marmer dan Abu Sekam Padi pada Beton Geopolimer. *Journal of Sustainable Construction*, 3(2), 45–53. <https://doi.org/10.26593/josc.v3i2.7905>
- Karmadi, K. A., & Widyasari, N. L. (n.d.). *PEMANFAATAN FLY ASH SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN SEMEN PORTLAND UNTUK MENGURANGI EMISI KARBON. KATALIS-DALAM-PERENGGAHAN-BIOMASSA-PRINSIP-DESAIN-DAN-APLIKASI*. (n.d.).
- Liman, K., & Sulistio, H. (2020). WASTE MATERIAL BETON PADA PROYEK KONSTRUKSI DI JAKARTA. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(1), 183. <https://doi.org/10.24912/jmts.v3i1.7066>
- Marcell, M., & Anondho, B. (2023). ANALISIS JUMLAH CARBON FOOTPRINT SEMEN PADA PEKERJAAN PLESTER DINDING PROYEK RUMAH TINGGAL. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 333–342. <https://doi.org/10.24912/jmts.v6i2.21884>
- Nasrullah, A., Firdaus, F., & Edowinsyah, E. (2022). PENGARUH CAMPURAN ABU LAYANG DAN ABU SEKAM PADI TERHADAP KEKUATAN KOMPRESI GEOPOLIMER MORTAR RINGAN. *Jurnal Tekno*, 19(2), 59–67. <https://doi.org/10.33557/jtekno.v19i2.1962>
- Politeknik Negeri Jakarta, Nisa, M. A., Sitanggang, A. N., & Universitas Esa Unggul. (2025). Literature Study on the Potential of Rice Husk Ash as a Local Pozzolanic Material in Concrete. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 6(1), 115–124. <https://doi.org/10.37253/jcep.v6i1.10399>
- Simanjuntak, I. V., Setiyadi, Mulyani, A. S., & Hutabarat, L. E. (2021). The effectiveness of biopore technology on infiltration rate and organic waste processing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 878(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/878/1/012045>.
- Simanjuntak, I. V., Tampubolon, S. P., & Simanjuntak, P. (2025). Optimalisasi Konduktivitas Termal Beton Berpori Melalui Inovasi Material Berbasis Abu Sekam Padi Dan Serat Kelapa Sebagai Bahan Tambah Ramah Lingkungan. *Emitor: Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 6(1), 47-57.
- Tampubolon, S. P. (2022). Struktur Beton I.