



## Pengaruh Abu Sekam Padi terhadap Kuat Tekan, Porositas, Permeabilitas Beton Porous

Dimas Mujahid Alhaq<sup>1</sup>, Arie Taveriyanto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang

<sup>2</sup>Pengajar Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang

[mujahidalhaq433@gmail.com](mailto:mujahidalhaq433@gmail.com), [arietaveriyanto@gmail.unnes.ac.id](mailto:arietaveriyanto@gmail.unnes.ac.id)

### Abstrak

Beton porous merupakan material perkerasan ramah lingkungan yang memiliki struktur pori terbuka sehingga memungkinkan air mengalir melalui beton dan mengurangi limpasan permukaan, serta mendukung penerapan sistem drainase berkelanjutan. Namun, karakteristik porositas yang tinggi menyebabkan kuat tekan beton porous relatif lebih rendah dibandingkan beton konvensional, sehingga diperlukan inovasi material untuk meningkatkan kinerjanya. Salah satu alternatif yang berpotensi adalah pemanfaatan abu sekam padi (rice husk ash/RHA) sebagai bahan substitusi sebagian semen, mengingat kandungan silika amorfnya yang bersifat pozzolanik. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi persentase RHA terhadap kuat tekan, porositas, dan permeabilitas beton porous. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi substitusi RHA sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen. Benda uji berupa silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm, yang diuji kuat tekan, porositas, dan permeabilitas pada umur pengujian tertentu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan RHA hingga kadar 15% mampu meningkatkan kuat tekan beton porous secara signifikan akibat terbentuknya produk reaksi pozzolanik yang memperbaiki ikatan pasta semen dan agregat, sekaligus menurunkan nilai porositas. Namun, pada substitusi RHA di atas 15%, kuat tekan mengalami penurunan yang disebabkan oleh kelebihan partikel halus yang tidak bereaksi secara optimal. Nilai permeabilitas cenderung menurun seiring meningkatnya kadar RHA, tetapi masih berada dalam rentang yang memenuhi fungsi beton porous. Berdasarkan hasil tersebut, kadar RHA optimum diperoleh pada 15%, karena mampu memberikan keseimbangan antara kinerja mekanik dan karakteristik hidrolis. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pemanfaatan limbah sekam padi sebagai material konstruksi berkelanjutan serta menjadi acuan dalam perancangan beton porous berkinerja tinggi.

Kata kunci: Beton Porous, Abu Sekam Padi, Kuat Tekan, Porositas, Permeabilitas.

### 1. Latar Belakang

Beton porous memiliki keunggulan utama dalam mendukung sistem drainase berkelanjutan dan manajemen air hujan di kawasan perkotaan. Dengan struktur berpori yang memungkinkan air meresap langsung ke tanah, beton ini mampu mengurangi limpasan permukaan, menekan risiko banjir, serta membantu pengisian kembali air tanah [1]. Beton porous merupakan material konstruksi inovatif yang mampu menyerap dan meresapkan air, sehingga efektif mengurangi limpasan permukaan dan mendukung pengelolaan air hujan secara alami. Struktur berongganya meningkatkan infiltrasi air, namun kuat tekannya relatif rendah karena keterbatasan pasta semen. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, Abu Sekam Padi atau *Rice Husk Ash* (RHA) menjadi alternatif ramah lingkungan dan ekonomis. RHA merupakan limbah pertanian kaya silika amorf ( $\text{SiO}_2$ ) dengan sifat pozzolanik yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk senyawa C-S-H yang memperkuat struktur beton [2]. Dalam kondisi tersebut, RHA menunjukkan sifat pozzolanik, yaitu kemampuan untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] yang terbentuk selama hidrasi semen, menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) sekunder [3]. Penggunaannya berpotensi meningkatkan kuat tekan tanpa mengurangi porositas, sehingga ideal untuk beton porous [4]. Substitusi RHA dalam jumlah tepat dapat mengisi pori mikroskopis dan memperkuat ikatan antar agregat melalui pembentukan C-S-H, sehingga meningkatkan kuat tekan dengan tetap menjaga porositas [4]. Penelitian ini berfokus pada pengaruh variasi persentase RHA terhadap kuat tekan, porositas, dan permeabilitas beton porous untuk menemukan komposisi optimal yang menyeimbangkan kekuatan dan kemampuan aliran air.

Masalah utama yang dihadapi beton porous adalah kuat tekan yang cenderung rendah akibat minimnya pasta semen dan tidak digunakannya agregat halus, sehingga diperlukan strategi peningkatan kekuatan tanpa mengurangi fungsi porositas sebagai jalur resapan air. Di sisi lain, tingginya konsumsi semen dalam industri konstruksi memberikan dampak lingkungan yang serius karena menghasilkan emisi karbon dalam jumlah besar. Indonesia sebagai negara agraris memproduksi lebih dari 50 juta ton gabah setiap tahun dan menghasilkan limbah sekam dalam skala besar yang berpotensi dikonversi menjadi abu sekam padi (RHA) sebagai pozzolan bernilai tambah. Abu sekam padi memiliki potensi sebagai bahan pengganti sebagian semen yang mampu meningkatkan kinerja beton serta mendukung keberlanjutan melalui pemanfaatan limbah dan pengurangan emisi karbon [5]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa RHA memiliki potensi besar dalam meningkatkan performa beton, di mana substitusi pada kadar 10–20% tidak menurunkan kinerja beton [2]. Kuat tekan optimal pada batas 10% juga dilaporkan dalam penelitian sebelumnya [6]. Abu sekam padi (RHA) terbukti berkontribusi dalam meningkatkan kuat tarik sekaligus menurunkan porositas pada beton geopolimer, dengan proporsi terbaik pada 10% yang menghasilkan kuat tarik sebesar 1,061 MPa dan porositas terendah 13,13%. [7]. Namun peningkatan kadar RHA melebihi 10% berat semen menyebabkan penurunan pada sifat kelekatan serta kuat tekan beton, dengan penurunan kinerja yang semakin signifikan seiring bertambahnya dosis substitusi [8]. Penambahan RHA juga dilaporkan mampu meningkatkan daya tahan dan menekan emisi CO<sub>2</sub> hingga 40% [9]. Campuran 10% RHA dan 5% serbuk tempurung kelapa menghasilkan kuat tekan maksimum 15 N/mm<sup>2</sup> pada umur 28 hari [10]. RHA dapat menggantikan hingga 10% semen tanpa mengurangi kuat tekan, namun penggunaan lebih dari 15% menyebabkan penurunan kekuatan dan durabilitas [11]. Pada kadar 5%, RHA terbukti meningkatkan kuat tekan hingga 12,65% [12]. penambahan 5–10% abu sekam padi (RHA) meningkatkan kekuatan tekan hingga 29% dan meningkatkan ketahanan abrasi sambil mempertahankan permeabilitas [13]. Kandungan RHA sedang (5–7,5%) dapat meningkatkan performa beton, dengan kadar 7,5% memberikan kekuatan tekan dan lentur tertinggi pada umur 56 hari, sementara dosis rendah menunjukkan penurunan kekuatan awal akibat reaksi pozzolanik yang lambat, dan dosis tinggi ( $\geq 12,5\%$ ) menyebabkan penurunan kekuatan karena pengenceran semen berlebih [14]. Selain itu, penggunaan RHA juga mendukung keberlanjutan melalui pengurangan penggunaan semen dan emisi karbon dalam konstruksi [15]. Abu sekam padi memiliki potensi besar sebagai bahan tambahan semen (SCM) pada pembuatan beton, karena aktivitas pozzolaniknya mampu meningkatkan kekuatan serta menurunkan tingkat permeabilitas sehingga beton menjadi lebih padat dan tahan terhadap penetrasi air [16]. Penggunaan RHA sebagai pengganti sebagian abu terbang pada beton geopolimer dapat meningkatkan daya tahan material dengan menurunkan penyerapan air dan porositas sehingga ketahanan terhadap penetrasi kelembaban menjadi lebih baik [17]. Hal itu sejalan bahwa substitusi 10% abu sekam padi mampu meningkatkan kekuatan tekan, ketahanan abrasi, dan menurunkan daya serap beton terutama pada umur lanjut serta tetap stabil dalam lingkungan kimia agresif, sehingga RHA berperan sebagai bahan pozzolan sekaligus agen pengawet internal yang memperbaiki kinerja beton [18]. Meskipun demikian, kajian yang berfokus pada aplikasi RHA dalam beton porous masih terbatas sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memperoleh dosis optimum. Oleh karena itu, penelitian ini menguji variasi RHA 0%–20% untuk menganalisis keterkaitan kuat tekan, porositas, dan permeabilitas, serta menentukan persentase optimal yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara kekuatan struktur dan kemampuan aliran air. Hasil yang diperoleh diharapkan memberikan sumbangan bagi pengembangan beton porous berbasis pozzolan alternatif serta menjadi rujukan praktis dalam perencanaan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

Secara material, beton porous terdiri atas semen Portland, agregat kasar, air, dan RHA, tanpa agregat halus, menghasilkan porositas sekitar 15–30 % [19],[20]. Rasio campuran (1: 4: 0,6) semen : agregat : semen dipilih sesuai ACI 522R-10 untuk menjaga porositas yang cukup besar. Rasio air-semen dan tingkat pepadatan menjadi faktor penting karena berpengaruh langsung terhadap kekuatan dan kemampuan infiltrasi [21]. Rasio agregat terhadap semen yang lebih rendah dan rasio air terhadap semen yang lebih tinggi menyebabkan pengurangan porositas, yang menurunkan koefisien permeabilitas tetapi meningkatkan kuat tekan, begitu pula sebaliknya [22]. Bahan tambah mineral seperti RHA memiliki kandungan silika amorf tinggi yang bereaksi membentuk C–S–H, meningkatkan kerapatan dan ketahanan beton [23]. Nukleasi Calcium Silicate Hydrate (C–S–H) merupakan tahap penting dalam proses hidrasi semen karena sangat memengaruhi aliran adukan, kerapatan mikrostruktur, serta kekuatan dan ketahanan beton [24]. Selain itu, penggunaan RHA membantu menekan emisi karbon dari produksi semen dan mengurangi limbah pertanian [8].

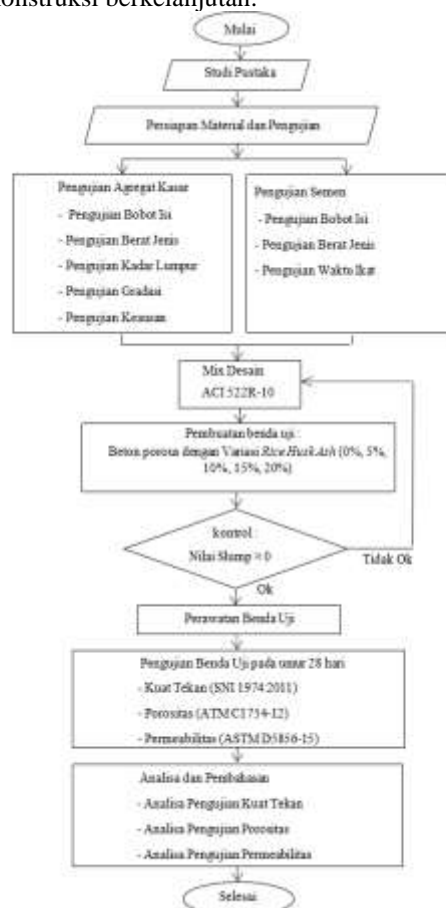
Kualitas RHA dipengaruhi oleh suhu pembakaran, di mana rentang 500–700 °C menghasilkan silika amorf yang reaktif, sedangkan suhu lebih tinggi menjadikannya kristalin dan kurang efektif [25]. Abu sekam padi memiliki kandungan silika amorf tinggi, sekitar 85–90 %, sehingga tergolong material pozzolanik unggul [26]. Partikelnya yang sangat halus mempercepat hidrasi dan memperkuat zona transisi antarmuka, meski meningkatkan kebutuhan air [4]. Kandungan unsur minor seperti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, dan MgO serta nilai LOI rendah (<10 %) menunjukkan

pembakaran optimal, sementara analisis FTIR, XRD, SEM, dan TEM mengonfirmasi dominasi silika amorf [27]. Dengan sifat tersebut, RHA mampu memperbaiki mikrostruktur dan meningkatkan performa beton porous.

Meskipun pemanfaatan abu sekam padi (RHA) dalam beton telah banyak diteliti, penerapannya pada beton porous masih menyisakan beberapa persoalan penting, seperti belum adanya kesepakatan mengenai kadar substitusi ideal yang mampu mempertahankan permeabilitas tanpa menurunkan kekuatan, serta pemahaman yang belum menyeluruh terkait perubahan mikrostruktur akibat reaksi pozzolanik RHA pada rongga pori yang lebih besar dibanding beton konvensional. Variasi kualitas RHA akibat perbedaan suhu pembakaran dan sifat fisiknya yang meningkatkan kebutuhan air juga menyebabkan hasil penelitian sebelumnya kurang konsisten. Untuk menjawab celah pengetahuan tersebut, penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan variasi substitusi RHA sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% guna menganalisis pengaruhnya terhadap kuat tekan, porositas, dan permeabilitas beton porous. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan data empiris yang lebih komprehensif dalam menilai efektivitas RHA sebagai bahan pozzolan ramah lingkungan yang memperbaiki mikrostruktur tanpa mengurangi fungsi utama beton porous sebagai material resapan air. Secara akademik, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan inovasi material konstruksi berkelanjutan, sedangkan secara praktis dapat menjadi acuan dalam perancangan beton porous dengan keseimbangan optimal antara kinerja mekanik dan hidraulik. Dengan demikian, tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh variasi persentase RHA terhadap kuat tekan, porositas, dan permeabilitas beton porous serta menentukan dosis optimum yang dapat meningkatkan kinerja beton secara keseluruhan.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode kuantitatif eksperimental untuk menguji pengaruh variasi persentase abu sekam padi terhadap kuat tekan, porositas, dan permeabilitas beton porous secara objektif dan terukur. Melalui desain eksperimen yang sistematis, hubungan sebab-akibat dapat dianalisis secara jelas, sehingga diperoleh bukti empiris mengenai potensi RHA sebagai bahan tambahan ramah lingkungan untuk meningkatkan performa beton porous dan mendukung pengembangan konstruksi berkelanjutan.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

## 2.1. Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh campuran beton porous dengan variasi persentase abu sekam padi (RHA) sebagai bahan substitusi sebagian semen, yang secara teoretis mencakup semua kemungkinan campuran yang dapat dibuat dan diuji di laboratorium. Populasi ini memiliki karakteristik khusus berupa keseragaman bahan, proporsi, serta metode pengujian, sesuai dengan konsep populasi sebagai wilayah generalisasi yang memiliki karakteristik tertentu untuk diteliti dan ditarik kesimpulannya [28]. Sampel penelitian merupakan bagian dari populasi yang dianggap mampu mewakili keseluruhan karakteristik tersebut, berupa 15 benda uji silinder beton porous dengan lima variasi RHA (0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%) yang masing-masing diuji sebanyak tiga kali.

F adalah frekuensi dasar resonansi (MHz), M adalah massa molekul total gas  $\Delta$  yang diserap [1] dan A adalah luas elektroda ( $\text{cm}^2$ ) [7]. Setiap variabel dalam rumus harus dijelaskan dalam bentuk kalimat seperti di atas.

## 2.2. Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan segala sesuatu yang diamati, diukur, dan dipelajari oleh peneliti untuk memperoleh informasi mengenai suatu fenomena sehingga dapat ditarik kesimpulan [28]. Dalam penelitian ini digunakan tiga jenis variabel, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel terkontrol. Variabel bebas berupa persentase variasi abu sekam padi sebagai bahan substitusi sebagian semen. Variabel terikat meliputi kuat tekan, porositas, dan permeabilitas beton porous yang menjadi indikator kinerja material. Sementara itu, variabel terkontrol terdiri dari rasio air-semen, jenis semen, ukuran agregat, kondisi curing, serta umur benda uji yang seluruhnya dijaga tetap agar tidak memengaruhi hasil penelitian. Seluruh variabel tersebut diatur dan diukur secara sistematis untuk mengetahui pengaruh variasi abu sekam padi terhadap performa beton porous.

## 2.3. Metode Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui eksperimen laboratorium, yang dipilih karena sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu untuk menguji pengaruh variasi persentase abu sekam padi terhadap sifat mekanik dan fisik beton porous secara terukur. Dalam pelaksanaannya, peneliti melakukan serangkaian tahapan mulai dari pembuatan benda uji beton porous dengan variasi abu sekam padi (0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%), proses perawatan (*curing*), hingga pengujian kuat tekan, porositas, dan permeabilitas sesuai dengan prosedur standar uji seperti SNI 1974-2011 untuk kuat tekan, ASTM C1754 untuk porositas, dan ASTM D5856-15 untuk permeabilitas [29],[30],[31]. Setiap hasil pengujian dicatat secara sistematis dan dianalisis secara statistik untuk menentukan hubungan kausal antara variabel bebas (persentase abu sekam padi) dan variabel terikat (kuat tekan, porositas, dan permeabilitas). Selain eksperimen, peneliti juga melakukan studi literatur untuk mengumpulkan data sekunder dari berbagai sumber ilmiah yang relevan. Studi literatur ini dilakukan dengan menelaah hasil penelitian terdahulu yang membahas penggunaan abu sekam padi atau material pozzolanik lain dalam beton, guna memperkuat dasar teoritis, mendukung interpretasi hasil, serta memberikan konteks ilmiah yang lebih komprehensif terhadap temuan penelitian.

## 2.4. Teknik Analisis Data

Statistik deskriptif digunakan dalam penelitian ini untuk menggambarkan dan menyajikan data hasil pengujian sebagaimana adanya tanpa melakukan generalisasi atau pengujian hipotesis, sesuai dengan pendapat Sugiyono bahwa statistik deskriptif berfungsi menganalisis data dengan cara menjelaskan informasi yang diperoleh secara faktual [28]. Teknik analisis ini diterapkan pada data kuat tekan (MPa), porositas (%), dan permeabilitas ( $\text{cm/s}$ ) beton porous dengan variasi persentase abu sekam padi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Hasil eksperimen ditampilkan dalam bentuk tabel untuk menunjukkan nilai pengujian setiap benda uji secara rinci, serta grafik seperti diagram batang atau kurva tren yang digunakan untuk memvisualisasikan perubahan karakteristik beton akibat penambahan abu sekam padi sehingga memudahkan interpretasi dan perbandingan antar variasi campuran.

## 3. Hasil dan Diskusi

Berdasarkan serangkaian pengujian laboratorium, diperoleh data mengenai kualitas material penyusun dan kinerja beton porous dengan variasi abu sekam padi. Hasil pengujian agregat kasar dan semen digunakan untuk memastikan kelayakan material sebelum dicampurkan, sedangkan pengujian kuat tekan, porositas, dan permeabilitas dilakukan untuk menilai pengaruh substitusi RHA terhadap performa beton porous. Seluruh hasil

tersebut dipaparkan secara sistematis pada bagian berikut untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai efektivitas penggunaan RHA dalam campuran beton porous.

### 3.1. Agregat Kasar

Tabel 1. Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Nilai
1	Bobot Isi Lepas Agregat	1.34 gram/cm <sup>3</sup>
2	Bobot Isi Padat Agregat	1.54 gram/cm <sup>3</sup>
3	Berat Jenis Agregat	2.52 gram/cm <sup>3</sup>
4	Kadar Lumpur	0.49%
5	Gradasi	6.91
6	Keausan ( <i>Los Angeles</i> )	16.52%

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari daerah Muntilan yang dikenal memiliki kualitas kerikil alami yang baik untuk bahan campuran beton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat memiliki bobot isi lepas sebesar 1,34 g/cm<sup>3</sup> dan bobot isi padat sebesar 1,54 g/cm<sup>3</sup>, yang menandakan kerapatan butiran dan tingkat kepadatan agregat yang baik. Nilai berat jenis rata-rata sebesar 2,52 g/cm<sup>3</sup> masih berada dalam kisaran standar 2,4–2,7, menunjukkan agregat memiliki kepadatan yang memadai dan pori yang tidak berlebihan. Nilai daya serap air sebesar 9–10% juga tergolong sesuai untuk beton porous, karena membantu menjaga kestabilan campuran serta pembentukan rongga udara yang saling terhubung. Nilai kadar lumpur rata-rata sebesar 0,49% berada di bawah batas maksimum 1%, menandakan agregat memiliki kebersihan dan kualitas permukaan butir yang baik. Hasil pengujian gradasi menunjukkan nilai Modulus Halus Butir (MHB) sebesar 6,91 dengan ukuran butir maksimum 20 mm, yang ideal untuk beton porous karena mampu membentuk pori-pori terbuka yang mendukung kinerja drainase. Selain itu, hasil uji keausan menunjukkan nilai 16,52%, jauh di bawah batas maksimum 50%, yang berarti agregat memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi. Secara keseluruhan, agregat kasar dari Muntilan memenuhi seluruh kriteria mutu dan dinyatakan layak digunakan sebagai bahan penyusun utama dalam pembuatan beton porous.

### 3.2. Semen

Tabel 2. Hasil Pengujian Semen

No	Jenis Pengujian	Nilai
1	Bobot Isi Lepas Semen	1.03 gram/cm <sup>3</sup>
2	Bobot Isi Padat Semen	1.30 gram/cm <sup>3</sup>
3	Berat Jenis Semen	3.03 gram/cm <sup>3</sup>
4	Waktu Ikat Semen	84 menit

Semen yang digunakan dalam penelitian ini merupakan semen Portland merek Tiga Roda. Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium, bobot isi lepas semen memiliki nilai rata-rata sebesar 1,03 g/cm<sup>3</sup>, sedangkan bobot isi padat mencapai 1,30 g/cm<sup>3</sup>. Perbedaan nilai ini menunjukkan bahwa proses pemadatan meningkatkan kerapatan butiran semen, sehingga memperbaiki sifat pengisian rongga pada campuran beton. Hasil pengujian berat jenis semen menunjukkan nilai rata-rata 3,03 g/cm<sup>3</sup>, yang berada dalam kisaran standar 3,00–3,20 g/cm<sup>3</sup>. Nilai ini menandakan bahwa semen memiliki kehalusan dan kandungan mineral utama seperti silikat dan aluminat yang baik, serta tidak mengalami penurunan mutu atau kontaminasi. Pengujian waktu ikat semen menunjukkan bahwa waktu ikat awal adalah 84 menit, dan waktu ikat akhir 150 menit, yang masih memenuhi ketentuan bahwa waktu ikat awal tidak boleh kurang dari 45 menit dan waktu ikat akhir tidak boleh lebih dari 375 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa semen memiliki reaktivitas dan kehalusan yang baik, memberikan waktu kerja yang memadai dalam proses pencampuran dan pengecoran, serta menghasilkan ikatan yang kuat dan stabil pada beton porous. Secara keseluruhan, semen yang digunakan memenuhi kriteria kualitas fisik dan kimia yang diperlukan untuk pembuatan beton porous yang padat, homogen, dan memiliki kinerja mekanik yang optimal.

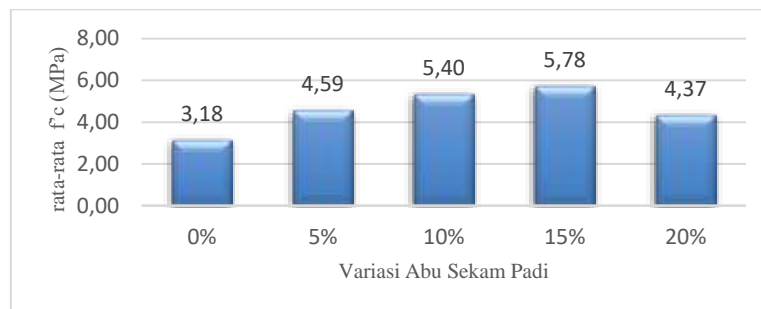
### 3.3. Slump



Gambar 2. Hasil Pengujian Slump

Pengujian workability dilakukan menggunakan alat uji slump di Laboratorium Struktur dan Bahan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang untuk mengetahui tingkat kelecakan campuran beton porous. Pengujian ini dilakukan sesuai dengan prosedur (ASTM C143) yang disesuaikan dengan rekomendasi (ACI-522R-10) tentang beton porous [32]. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tinggi slump beton porous adalah 0 cm, artinya campuran tidak mengalami penurunan setelah kerucut slump diangkat. Nilai slump tersebut menandakan bahwa campuran beton memiliki tingkat kelecakan yang sangat rendah, sesuai dengan karakteristik beton porous yang menggunakan jumlah air minimal agar rongga antar agregat tidak tertutup. Kondisi ini memperlihatkan bahwa pasta semen hanya melapisi butiran agregat tanpa mengisi ruang di antaranya, sehingga pori-pori tetap terbentuk dan memungkinkan air mengalir melalui struktur beton.

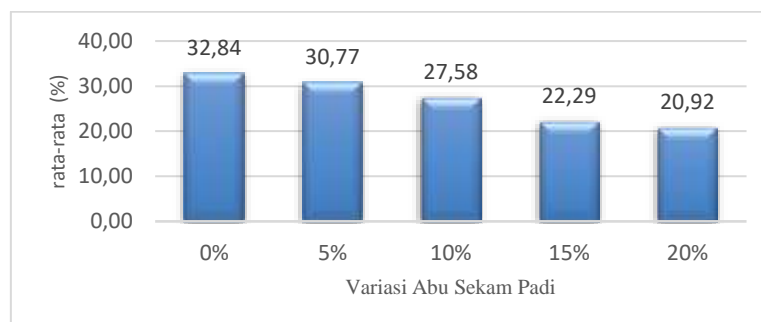
### 3.4. Kuat Tekan



Gambar 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan

Hasil uji kuat tekan menunjukkan bahwa penambahan RHA dapat meningkatkan kekuatan beton porous hingga mencapai kadar optimum pada 15%. Kuat tekan meningkat dari 3,18 MPa pada 0% menjadi 4,59 MPa pada 5%, 5,40 MPa pada 10%, dan tertinggi pada 15% sebesar 5,78 MPa. Peningkatan ini terjadi karena reaksi pozzolanik RHA yang membentuk C-S-H tambahan sehingga struktur beton menjadi lebih padat. Namun, pada 20% kuat tekan menurun menjadi 4,37 MPa karena pengurangan jumlah semen yang bereaksi. Oleh karena itu, komposisi 15% RHA dinilai paling optimal dalam meningkatkan kuat tekan beton porous.

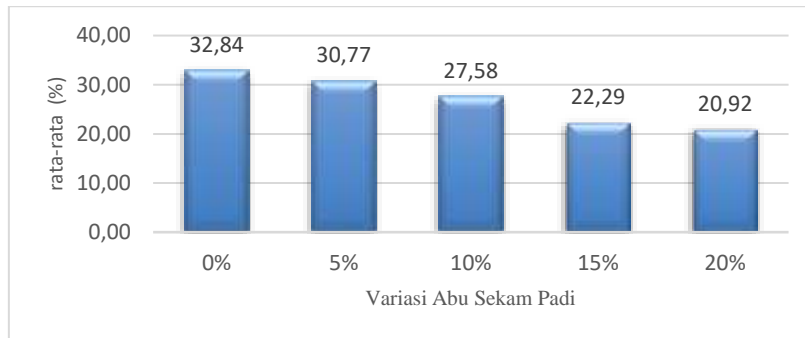
### 3.5. Porositas



Gambar 4. Hasil Pengujian Porositas

Hasil pengujian porositas menunjukkan bahwa peningkatan kadar abu sekam padi (RHA) menyebabkan penurunan porositas beton porous dari 32,84% pada variasi 0% menjadi 20,92% pada 20%. Partikel halus RHA mengisi rongga antar butiran agregat dan melalui reaksi pozzolanik yang membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (CSH) tambahan, memperpadat matriks beton. Dengan demikian, semakin tinggi kadar RHA, porositas beton semakin menurun, meskipun pada kadar yang berlebihan dapat mengurangi permeabilitas beton.

### 3.6. Permeabilitas



Gambar 5. Hasil Pengujian Permeabilitas

Hasil pengujian permeabilitas menunjukkan bahwa peningkatan kadar abu sekam padi (RHA) menyebabkan penurunan nilai permeabilitas beton porous dari 0,035 cm/s pada variasi 0% menjadi 0,020 cm/s pada 20%. Penurunan ini terjadi karena partikel halus RHA mengisi rongga antar agregat dan memperhalus struktur pori, sehingga jalur aliran air menjadi lebih sempit. Reaksi pozzolanik juga menghasilkan senyawa C-S-H tambahan yang memperkuat ikatan antar partikel dan menutup pori-pori mikro, menjadikan beton lebih padat dan kurang permeabel, meskipun kemampuan drainasenya sedikit berkurang.

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa abu sekam padi (RHA) berpengaruh nyata terhadap beton porous. Penambahan RHA mampu meningkatkan kuat tekan sekaligus menurunkan porositas dan permeabilitas melalui reaksi pozzolanik yang menghasilkan senyawa pengikat C-S-H. Variasi 15% RHA memberikan kinerja terbaik dengan kuat tekan mencapai 5,78 MPa, porositas menurun hingga 20,92%, dan permeabilitas berada pada 0,020 cm/s, sehingga dinilai sebagai komposisi paling optimal dalam menjaga keseimbangan antara kekuatan dan kemampuan resapan beton porous. Temuan ini berkontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dengan memperkuat dasar empiris pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan pozzolan alternatif dalam konstruksi berkelanjutan. Secara praktis, hasil penelitian memberikan manfaat bagi masyarakat dan industri konstruksi berupa solusi ramah lingkungan yang dapat mengurangi limbah sekam padi serta menekan konsumsi semen dan emisi karbon dalam pembangunan infrastruktur.

## Referensi

- [1] S. Harada, "Application of Porous Concrete Infiltration Techniques to Street Stormwater Inlets That Simultaneously Mitigate against Non-Point Heavy Metal Pollution and Stormwater Runoff Reduction in Urban Areas: Catchment-Scale Evaluation of the Potential of Discrete and Small-Scale Techniques," Jun. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/w15111998.
- [2] S. A. Endale, W. Z. Taffese, D. H. Vo, and M. D. Yehualaw, "Rice Husk Ash in Concrete," Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/su15010137.
- [3] I. M. Nasser, M. H. Wan Ibrahim, S. S. Mohd Zuki, A. F. Alsharif, N. Nindyawati, and R. P. Jaya, "Effects of Milling Time on Nano Rice Husk Ash Particle Size," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Nov. 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202344501003.
- [4] J. Wang, X. Hu, F. Jiang, and H. Chen, "The Role and Mechanism of Rice Husk Ash Particle Characteristics in Cement Hydration Process," *Materials*, vol. 17, no. 22, Nov. 2024. doi: 10.3390/ma17225594.
- [5] S. Barbhuiya, B. B. Das, D. Adak, A. Rajput, and V. Katare, "Rice husk ash in structural concrete: influence on strength, durability and sustainability," *Discover Concrete and Cement*, vol. 1, no. 1, Aug. 2025. doi: 10.1007/s44416-025-00013-9.
- [6] D. Guntama, G. L. Hakim, and N. Amin, "Potential Rice Husk Ash (RHA) For Clinker Substitute in K400 Concrete Compressive Strength Applications," *Journal of Advanced Civil and Environmental Engineering*, vol. 5, no. 1, p. 24, Apr. 2022. doi: 10.30659/jacee.5.1.24-32.
- [7] A. N. Sari, E. Srisunarsih, and T. L. A. Sucipto, "The Use of Rice Husk Ash in Enhancing the Material Properties of Fly Ash-Based Self Compacted Geopolymer Concrete," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Mar. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1808/1/012011.

- [8] I. H. Wagan, A. H. Memon, N. A. Memon, F. T. Memon, and M. H. Lashari, "Rice Husk Ash (RHA) Based Concrete: Workability and Compressive Strength with Different Dosages and Curing Ages," *Journal of Applied Engineering Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 113–120, May 2022, doi: 10.2478/jaes-2022-0016.
- [9] E. Öztürk, C. Ince, Y. Borgianni, S. Derogar, A. M. Forster, and R. J. Ball, "Enhancing Concrete Durability and Resource Efficiency Through Rice Husk Ash Incorporation: A Data-Driven Approach," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 21, Nov. 2025, doi: 10.3390/su17219382.
- [10] C. S. Lee, M. D. Mashur, and M. A. Roslan, "Utilizing Rice Husk Ash and Coconut Shell as Partial Replacement Materials in Concrete," 2024.
- [11] O. Zaid, J. Ahmad, M. S. Siddique, and F. Aslam, "Effect of Incorporation of Rice Husk Ash Instead of Cement on the Performance of Steel Fibers Reinforced Concrete," *Front Mater.*, vol. 8, Jun. 2021, doi: 10.3389/fmats.2021.665625.
- [12] N. Bheel, P. Awoyera, I. A. Shar, S. Sohu, S. A. Abbasi, and A. Krishna Prakash, "Mechanical Properties of Concrete Incorporating Rice Husk Ash and Wheat Straw Ash as Ternary Cementitious Material," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/2977428.
- [13] E. Khankhaje, H. Jang, J. Kim, and M. Rafieizonooz, "Utilizing rice husk ash as cement replacement in pervious concrete: A review," *Developments in the Built Environment*, vol. 22, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.dibe.2025.100675.
- [14] M. A. Albadrani, "Strength Development of PPC Concrete with Rice Husk Ash: Optimal Replacement Levels for Sustainable Construction," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 18, Sep. 2025, doi: 10.3390/su17188258.
- [15] M. Indumathi, G. Nakkeeran, D. Roy, S. K. Gupta, and G. U. Alaneme, "Innovative approaches to sustainable construction: a detailed study of rice husk ash as an eco-friendly substitute in cement production," Nov. 01, 2024, *Springer Nature*. doi: 10.1007/s42452-024-06314-1.
- [16] M. J. Alam, M. Biswas, M. B. Mia, S. Alam, and M. M. Hossain, "The Influence of Rice Husk Ash on Mechanical Properties of the Mortar and Concrete: A Critical Review," *Open Journal of Civil Engineering*, vol. 14, no. 01, pp. 65–81, 2024, doi: 10.4236/ojce.2024.141003.
- [17] C. Manoj Prabhu, B. Selvam, C. Vinodhini, L. M. Nirmal, R. Elavarasan, and E. Kavitha, "Influence of Rice Husk Ash on the durability of geopolymer concrete under different molarities," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., Jun. 2025, pp. 207–214. doi: 10.1016/j.prostr.2025.07.045.
- [18] A. Shamsudeen Abdulazeez, B. Hamza, A. S. Abubakar, and T. Mohammed, "Afropolitan Journals Effect of Rice Husk Ash on the Durability Properties of Concrete Subject to Aggressive Chemical Environment," TETFUND) Nigeria, 2022. [Online]. Available: [www.afropolitanjournals.com](http://www.afropolitanjournals.com)
- [19] Q. Xiao, Y. Xia, G. Zhang, X. Lin, and J. Zhao, "Numerical simulation study on pore clogging of pervious concrete pavement based on different aggregate gradation," *Front Phys.*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fphy.2023.1162899.
- [20] A. Setyawan *et al.*, "Development of Single Sized Aggregate Porous Concrete for Sustainable Road in Low Traffic Area," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Jun. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1912/1/012054.
- [21] J. H. Park, S. T. Jeong, Q. T. Bui, and I. H. Yang, "Strength and Permeability Properties of Pervious Concrete Containing Coal Bottom Ash Aggregates," *Materials*, vol. 15, no. 21, Nov. 2022, doi: 10.3390/ma15217847.
- [22] Q. Liu, H. Li, Y. Zhang, D. Ke, S. Yin, and S. Tian, "EXPERIMENTAL STUDY ON FACTORS INFLUENCING THE PERMEABLE CONCRETE PERFORMANCE ON THE ROAD SURFACE," *Ceramics - Silikaty*, vol. 68, no. 2, pp. 242–251, 2024, doi: 10.13168/cs.2024.0024.
- [23] A. A. K. Al-Alwan *et al.*, "The impact of using rice husk ash as a replacement material in concrete: An experimental study," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 36, no. 4, pp. 249–255, May 2024, doi: 10.1016/j.jksues.2022.03.002.
- [24] X. M. Aretxabaleta, J. López-Zorrilla, I. Etxebarria, and H. Manzano, "Multi-step nucleation pathway of C-S-H during cement hydration from atomistic simulations," *Nat Commun.*, vol. 14, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-43500-y.
- [25] M. M. Hirose Carlsen and Y. Saito, "Phase diagram of SiO<sub>2</sub> crystallization upon rice husk combustion to control silica ash quality," *Waste Management*, vol. 182, pp. 55–62, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.04.009.
- [26] S. Syahrul, "Characteristics of Concrete With Rice Husk Ash Local Kutai Kartanegara," *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, vol. 24, no. 2, pp. 168–175, Oct. 2022, doi: 10.15294/jtsp.v24i2.37375.
- [27] Md. T. Islam, Md. F. Hossen, Md. A. Asraf, Md. Kudrat-E-Zahan, and C. M. Zakaria, "Production and Characterization of Silica from Rice Husk: An Updated Review," *Asian Journal of Chemical Sciences*, vol. 14, no. 2, pp. 83–96, Mar. 2024, doi: 10.9734/ajocs/2024/v14i2296.
- [28] Sugiyono, *METODE PENELITIAN KUANTITATIF, KUALITATIF, DAN R&D*. 2023. [Online]. Available: [www.cvalfabetta.com](http://www.cvalfabetta.com)
- [29] SNI 1974:2011, "SNI 1974:2011," *Badan Standarisasi Nasional, Jakarta*, 2011, [Online]. Available: <https://www.academia.edu/download/57886647/SNI-1974-2011-.pdf>
- [30] ASTM C1754/C1754M – 12, "Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete," *Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th Edition*, no. c, pp. 545-545–3, 2008, doi: 10.1520/mnl10913m.
- [31] ASTM D5856, "Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter," *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1520/D5856-15.2.
- [32] ACI-522R-10, "ACI-522R-10-Report-on-Pervious-Concrete-Reapproved-2011-American-Concrete-Institute-ACI-2010-pdf".