

OPTIMALISASI KONDUKTIVITAS TERMAL BETON BERPORI MELALUI INOVASI MATERIAL BERBASIS ABU SEKAM PADI DAN SERAT KELAPA SEBAGAI BAHAN TAMBAH RAMAH LINGKUNGAN

Irene Vista Simanjuntak¹, Sudarno P Tampubolon², Pinondang Simanjuntak³

^{1,2,3} Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia

Email: irenev.simanjuntak@uki.ac.id, sudarno.tampubolon@uki.ac.id, pinondang.simanjuntak@uki.ac.id

Masuk: 26-05-2025, revisi: 01-07-2025, diterima untuk diterbitkan: 24-07-2025

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan konduktivitas termal beton berpori melalui penambahan bahan tambah ramah lingkungan berupa abu sekam padi (RHA) dan serat kelapa. Variasi komposisi yang digunakan meliputi RHA sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen serta serat kelapa sebesar 0%, 0,5%, dan 1% dari berat total campuran. Lima kombinasi campuran dipilih untuk dianalisis berdasarkan keseimbangan antara workability, kekuatan, dan performa termal. Pengujian dilakukan terhadap slump (workability), kuat tekan (umur 28 hari), konduktivitas termal, penyerapan air, dan ketahanan terhadap siklus beku-cair. Hasil menunjukkan bahwa meskipun penambahan RHA dan serat kelapa menurunkan workability, kekuatan tekan dan ketahanan terhadap siklus beku-cair meningkat secara signifikan. Konduktivitas termal menurun hingga 23% pada kombinasi RHA 15% dan serat 1%, menandakan peningkatan kemampuan isolasi panas. Sementara itu, penyerapan air meningkat dengan bertambahnya serat, namun dapat ditekan dengan penambahan RHA. Kombinasi optimal diperoleh pada campuran dengan RHA 10% dan serat 1%, yang memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan mekanis, efisiensi termal, dan ketahanan lingkungan.

Kata kunci: Abu sekam padi; beton berpori; beton ramah lingkungan; serat kelapa; konduktivitas termal

ABSTRACT

The purpose of this study is to increase the thermal conductivity of pervious concrete by adding environmentally friendly supplemental materials, such as coconut fibre and rice husk ash (RHA). The material variations include RHA at 0%, 5%, 10%, and 15% by cement weight and coconut fiber at 0%, 0.5%, and 1% by total mix weight. Five selected combinations were analyzed based on the balance between workability, strength, and thermal performance. Tests conducted include slump (workability), compressive strength (at 28 days), thermal conductivity, water absorption, and freeze-thaw resistance. The results indicate that the addition of RHA and coconut fiber reduces workability but significantly enhances compressive strength and freeze-thaw durability. Thermal conductivity decreased by up to 23% in the mix with 15% RHA and 1% fiber, indicating improved thermal insulation capacity. While water absorption increased with higher fiber content, it was reduced by the presence of RHA. The optimal combination was found in the mix with 10% RHA and 1% coconut fiber, which offered the best balance between mechanical strength, thermal efficiency, and environmental durability.

Keywords: Coconut fiber; eco-friendly concrete; pervious concrete; rice husk ash; thermal conductivity

1. PENDAHULUAN

Isolasi termal merupakan salah satu aspek penting dalam desain bangunan modern untuk mengurangi kebutuhan energi pendinginan dan pemanasan. Seiring meningkatnya kesadaran terhadap efisiensi energi dan dampak perubahan iklim global, pemilihan material bangunan yang mampu mengurangi aliran panas tanpa mengorbankan kenyamanan termal menjadi krusial. (Prasetyo, n.d.) Beton berpori, sebagai material konstruksi dengan struktur berongga, telah lama dikenal memiliki potensi besar dalam aplikasi insulasi termal karena keberadaan rongga udara yang secara efektif menghambat perpindahan panas melalui konduksi, bahkan dapat membantu menurunkan suhu internal bangunan di iklim tropis. Namun, peningkatan

porositas ini biasanya berdampak negatif terhadap kekuatan mekanik beton, karena konektivitas pori yang tinggi menyebabkan berkurangnya luas penampang efektif dalam menahan beban, serta menurunkan integritas struktural campuran. Akibatnya, penggunaan beton berpori menjadi terbatas pada elemen-elemen non-struktural atau lapisan perkerasan drainase. (Tajalla et al., 2024)

Dalam upaya mengatasi masalah tersebut, inovasi material dengan pemanfaatan bahan tambah alami menjadi alternatif yang sangat menjanjikan, terutama yang berbasis limbah pertanian sebagai bagian dari pendekatan ekonomi sirkular. Abu sekam padi, juga dikenal sebagai abu sekam padi atau RHA, (Tampubolon et al., 2024) adalah sumber silika amorf pozzolanik yang sangat reaktif. (Politeknik Negeri Jakarta et al., 2025) Bisa digunakan sebagai pengganti sebagian semen portland dalam campuran beton. Reaksi antara silika dalam RHA dengan kalsium hidroksida yang dihasilkan dari hidrasi semen membentuk senyawa calcium silicate hydrate (C-S-H) tambahan yang sangat berperan dalam meningkatkan kekuatan beton dan memperbaiki kepadatan mikrostruktur (*Buku Struktur Beton 1*, n.d.). Selain itu, distribusi partikel halus dari RHA juga membantu mengisi pori-pori mikro (micro-pore filling effect), sehingga menurunkan permeabilitas dan meningkatkan durabilitas beton terhadap serangan kimia dan siklus beku-cair (*High Strenght Concrete*, n.d.) Secara simultan, struktur padat yang terbentuk juga berdampak terhadap penurunan konduktivitas termal, karena perpindahan panas menjadi lebih terhambat oleh penghalang internal padat. (Fahrudin, n.d.).

Selain itu, serat kelapa, yang merupakan bahan alami berstruktur selulosa berserat panjang dan memiliki rongga longitudinal mikroskopik, dapat berfungsi sebagai elemen penguat dan sekaligus isolator tambahan dalam beton berpori (*Analisis Suhu Ruang Pemanfaatan Serabut Kelapa*, n.d.). Serat ini memiliki kemampuan untuk menyerap energi deformasi dan meningkatkan kapasitas daktilitas campuran, terutama dalam menahan retak-retak awal akibat susut plastis atau beban tarik. Serat kelapa juga memberikan keuntungan dari aspek keberlanjutan karena bersifat biodegradable, tersedia melimpah, dan memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang cukup tinggi. Struktur berongga di dalam seratnya juga membantu menciptakan perangkap udara tambahan di dalam matriks beton, sehingga semakin memperkuat sifat isolasi termal dari campuran (Siregar et al., 2021). Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa serat alami dapat meningkatkan toughness dan memperpanjang waktu keruntuhan akibat propagasi retak, yang penting dalam struktur beton berpori dengan densitas rendah (Mawardi et al., n.d.).

Meskipun masing-masing bahan ini telah menunjukkan keunggulan tersendiri, penggabungan abu sekam padi dan serat kelapa sebagai bahan tambah beton berpori masih jarang dikaji secara terpadu, khususnya dalam konteks optimasi simultan antara konduktivitas termal, kekuatan mekanik, ketahanan air, dan durability terhadap lingkungan ekstrem (Desimaliana et al., 2024). Kombinasi ini berpotensi menciptakan sistem komposit mikrostruktur yang sinergis, di mana RHA bertindak sebagai pengisi aktif dan serat kelapa sebagai penahan deformasi mikro. Tantangan utama dalam pendekatan ini adalah menjaga keseimbangan antara workability campuran dan distribusi serat yang merata, serta memastikan bahwa RHA memiliki kehalusan dan kadar karbon yang sesuai untuk mencapai efek pozzolanik maksimal (Rommel et al., 2017). Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh terhadap interaksi kimia dan fisik antar material menjadi sangat penting untuk menghasilkan beton berpori yang tidak hanya hemat energi tetapi juga memiliki performansi struktural dan lingkungan yang unggul (Setiawan, 2022).

Penelitian ini berfokus pada pengembangan beton berpori inovatif yang mengintegrasikan abu sekam padi dan serat kelapa untuk mengoptimalkan konduktivitas termal dan kekuatan

tekan, dengan tetap mempertahankan workability dan porositas dalam kisaran yang dibutuhkan untuk fungsi permeabilitas. Melalui pengujian makroskopik dan mikrostruktur serta analisis karakteristik termal dan mekanik pada berbagai umur beton, diharapkan diperoleh komposisi optimum yang dapat menunjang pengaplikasian beton berpori sebagai material konstruksi berkelanjutan, efisien energi, dan ramah lingkungan, sesuai dengan prinsip green construction dan low-carbon development (Chen et al., 2023)

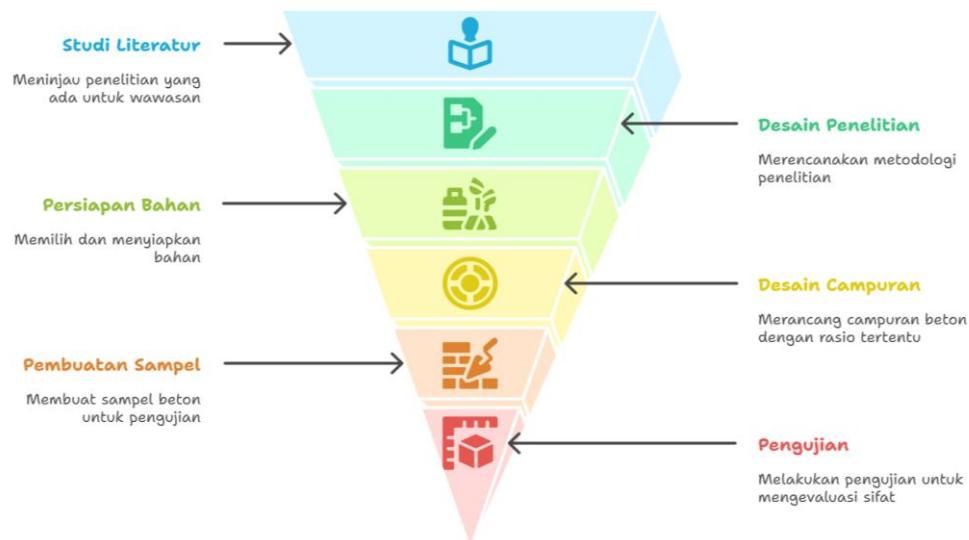
Berdasarkan uraian latar belakang yang telah disampaikan, maka permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini dirumuskan ke dalam beberapa fokus kajian. Pertama, bagaimana pengaruh variasi abu sekam padi (*Rice Husk Ash/ RHA*) terhadap sifat termal dan mekanik beton berpori. Kedua, sejauh mana penambahan serat kelapa dapat memengaruhi konduktivitas termal, kuat tekan, dan daya tahan beton berpori. Ketiga, bagaimana kombinasi optimal antara abu sekam padi dan serat kelapa dapat menghasilkan beton berpori dengan konduktivitas termal yang rendah namun tetap mempertahankan kekuatan mekanik yang memadai. Keempat, bagaimana performa beton berpori berbahan tambah RHA dan serat kelapa terhadap kemampuan penyerapan air serta ketahanannya terhadap siklus beku-cair. Rumusan masalah ini menjadi dasar dalam merancang metode penelitian dan analisis data untuk menjawab tujuan utama studi (Simanjuntak & Tampubolon, 2022). Penelitian ini bertujuan untuk mencapai pemahaman yang mendalam serta memberikan solusi terhadap permasalahan yang telah dirumuskan sebelumnya. Secara khusus, tujuan dari penelitian ini meliputi: (1) menganalisis pengaruh penambahan abu sekam padi (RHA) terhadap konduktivitas termal, kuat tekan, dan sifat fisik beton berpori (Sulfianty et al., 2020) (2) menilai kontribusi serat kelapa dalam meningkatkan kekuatan, daya tahan, dan kemampuan isolasi termal beton berpori; (3) menentukan kombinasi optimal antara RHA dan serat kelapa yang mampu menghasilkan performa termal dan mekanik terbaik; serta (4) mengevaluasi kinerja beton berpori berbahan tambah RHA dan serat kelapa terhadap faktor lingkungan, khususnya penyerapan air dan ketahanan terhadap siklus beku-cair. Tujuan-tujuan ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam mengembangkan beton berpori yang ramah lingkungan dan berkinerja tinggi (Zalukhu et al., 2017)

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh sejumlah manfaat yang relevan dengan permasalahan yang diangkat, yang mencakup aspek akademik, praktis, dan lingkungan. Dari segi manfaat akademik, penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan material beton berpori yang ramah lingkungan berbasis limbah pertanian (Tang et al., 2021), serta menjadi referensi bagi kajian lanjutan dalam pemanfaatan bahan tambah alami untuk mengoptimalkan sifat termal dan mekanik beton. Dari sisi manfaat praktis, hasil penelitian ini dapat menawarkan alternatif solusi berupa beton ringan dan isolatif yang sesuai digunakan pada bangunan hemat energi, terutama di wilayah beriklim tropis (Laia et al., 2023). Selain itu, penelitian ini juga mendukung pengelolaan limbah pertanian seperti sekam padi dan sabut kelapa melalui pendekatan pemanfaatan berkelanjutan dalam bidang konstruksi. Sementara itu, dalam konteks manfaat lingkungan, penelitian ini berpotensi mengurangi emisi karbon melalui penurunan konsumsi semen serta penggunaan limbah organik lokal, sekaligus mendukung penerapan konsep konstruksi berkelanjutan dan pengembangan material dengan jejak ekologis yang rendah (Lubis & Putri, 2024).

2. METODOLOGI

Untuk mencapai tujuan penelitian ini, dilakukan serangkaian tahapan sistematis yang membentuk suatu alur kerja penelitian yang terstruktur. Proses dimulai dari studi literatur untuk menelaah penelitian terdahulu sebagai dasar pengembangan wawasan dan landasan teoritis. Tahap selanjutnya meliputi persiapan bahan dan perancangan metodologi melalui desain

penelitian, yang kemudian dilanjutkan dengan perencanaan komposisi campuran beton, pembuatan sampel uji, serta pengujian laboratorium guna mengevaluasi sifat beton secara menyeluruh. Alur lengkap dari tahapan metodologi tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan abu sekam padi (RHA) dan serat kelapa sebagai bahan tambah ramah lingkungan dalam beton berpori untuk menurunkan konduktivitas termal dan mempertahankan kekuatan mekanik. Beton berpori memiliki struktur rongga udara yang dapat menghambat perpindahan panas, namun peningkatan porositas sering kali menurunkan kuat tekan. Abu sekam padi dipilih karena kandungan silika amorfnya yang tinggi, yang bereaksi secara pozzolanik membentuk C-S-H sehingga memperbaiki mikrostruktur dan mengisi pori-pori halus, berkontribusi pada kekuatan dan penurunan jalur panas. Serat kelapa, dengan struktur berongga dan sifat fleksibel, berfungsi sebagai penguat serta penahan retak, sekaligus menambah hambatan termal melalui jaringan serat yang tersebar dalam matriks beton. Sinergi kedua bahan ini diharapkan menghasilkan beton berpori dengan konduktivitas termal rendah, kuat tekan yang memadai, dan ketahanan lingkungan yang baik, mendukung aplikasi bangunan hemat energi dan berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini berkontribusi pada manajemen limbah pertanian dan pengurangan emisi karbon dari industri konstruksi.

Penelitian ini menggunakan beberapa jenis bahan utama dengan karakteristik tertentu untuk menghasilkan campuran beton yang inovatif. Semen yang digunakan adalah Semen Portland Tipe I, yang umum dipakai dalam konstruksi karena memiliki kekuatan awal yang baik dan cocok untuk berbagai jenis struktur. Sebagai bahan substitusi sebagian semen, digunakan Abu Sekam Padi (*Rice Husk Ash/ RHA*) yang kaya kandungan silika amorf dan berpotensi meningkatkan kekuatan serta durabilitas beton melalui reaksi *pozzolan*. Selain itu, Serat Kelapa ditambahkan sebagai material penguat alami yang bertujuan meningkatkan ketahanan terhadap retak serta memberikan fleksibilitas struktural tambahan. Agregat halus dan kasar berfungsi sebagai pengisi utama dalam campuran beton, dipilih berdasarkan gradasi yang memenuhi standar untuk memastikan kepadatan dan kekuatan optimal. Campuran ini juga menggunakan air bersih untuk proses hidrasi semen dan aditif jenis superplasticizer guna meningkatkan workability tanpa menambah kadar air, sehingga menghasilkan beton yang

mudah dikerjakan namun tetap berkekuatan tinggi. Kombinasi bahan-bahan tersebut diharapkan dapat menghasilkan beton dengan performa mekanik dan durabilitas yang lebih baik serta ramah lingkungan.

2.2 Perancangan Campuran

Dalam perancangan campuran beton pada penelitian ini, dilakukan beberapa variasi bahan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap sifat dan kinerja beton. Abu Sekam Padi (RHA) digunakan sebagai bahan substitusi sebagian semen dengan variasi sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari total berat semen. Substitusi ini bertujuan untuk mengkaji efek aktivitas pozzolanik RHA terhadap kekuatan dan porositas beton. Selain itu, digunakan serat kelapa sebagai bahan tambahan untuk meningkatkan ketahanan terhadap retak, dengan variasi sebesar 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5% dari berat total campuran. Rasio air terhadap semen (w/c) ditetapkan sebesar 0,45 guna menjaga keseimbangan antara workability dan kekuatan beton. Campuran beton juga dirancang untuk mencapai target porositas antara 15% hingga 25%, sesuai dengan karakteristik beton berpori yang diharapkan memiliki permeabilitas dan kemampuan drainase yang baik, namun tetap memiliki kekuatan struktural yang memadai. Variasi dan parameter ini disusun secara sistematis untuk memperoleh data yang relevan dalam analisis pengaruh RHA dan serat kelapa terhadap sifat beton.

2.3 Pengujian Laboratorium

Untuk mengevaluasi performa beton hasil campuran, dilakukan serangkaian pengujian terhadap beton segar maupun beton yang telah mengeras. Uji workability dilakukan dengan metode slump test (ASTM C143) untuk menilai kemudahan pengerjaan beton segar, khususnya dalam kaitannya dengan variasi kandungan abu sekam padi (RHA) dan serat kelapa. Selain itu, dilakukan uji berat jenis beton segar guna memastikan konsistensi dan kepadatan campuran yang sesuai standar.

Pengujian beton mengeras difokuskan pada beberapa aspek kinerja utama. Uji kuat tekan (ASTM C39) dilakukan pada umur 28 hari guna menilai pengaruh variasi RHA dan serat kelapa terhadap kekuatan struktural beton berpori. Untuk menilai performa isolasi termal, dilakukan uji konduktivitas termal menggunakan metode Source Transient Plane (TPS) dan Guarded Hot Plate, pada suhu lingkungan 25°C, guna memperoleh karakteristik perpindahan panas beton yang digunakan sebagai bahan bangunan alternatif. Dari sisi durabilitas, dilakukan dua jenis pengujian. Pertama, uji penyerapan air (ASTM C642) untuk mengetahui tingkat kemampuan beton menyerap air, yang berkaitan langsung dengan ketahanannya terhadap pelapukan dan kerusakan. Kedua, dilakukan uji ketahanan terhadap siklus pembekuan dan pencairan (ASTM C666) untuk mengamati bagaimana beton bereaksi terhadap perubahan suhu ekstrem secara berulang. Seluruh pengujian ini bertujuan memberikan gambaran komprehensif terhadap performa mekanis, termal, dan ketahanan beton berpori yang dimodifikasi dengan bahan tambahan alami.

2.4 Standar Panduan (SNI/ ASTM)

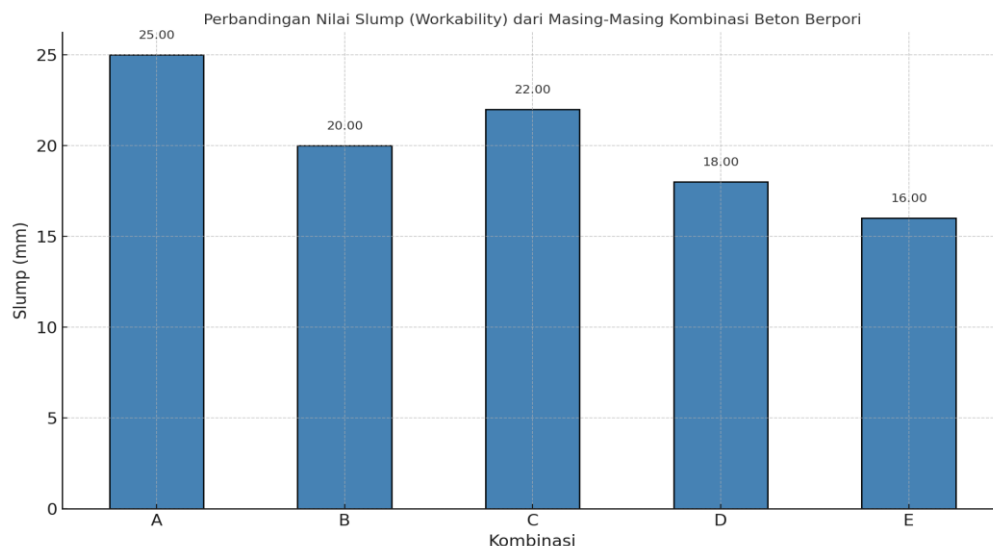
Dalam pelaksanaan penelitian ini, seluruh prosedur pengujian mengacu pada standar internasional dan nasional yang diakui, guna menjamin validitas dan keterbandingan hasil. Uji slump untuk menilai workability beton segar dilakukan sesuai standar ASTM C143. Untuk pengujian kuat tekan beton, digunakan metode ASTM C39 dan SNI 1974, yang keduanya memberikan acuan dalam pengujian kuat tekan silinder beton pada umur tertentu, khususnya pada 28 hari. Pengujian konduktivitas termal menggunakan metode ASTM C177 dan ISO 22007, yang merupakan standar umum dalam pengukuran properti termal material bangunan. Sementara itu, untuk mengukur penyerapan air sebagai salah satu indikator durabilitas beton,

digunakan metode ASTM C642. Terakhir, uji ketahanan beton terhadap perubahan suhu ekstrem dilakukan dengan pengujian siklus pembekuan dan pencairan sesuai standar ASTM C666. Seluruh standar ini dipilih agar hasil pengujian dapat diinterpretasikan secara ilmiah dan konsisten dengan praktik pengujian beton pada umumnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter pengujian dalam penelitian ini meliputi workability (uji slump), kuat tekan, konduktivitas termal, penyerapan air, dan ketahanan terhadap siklus beku-cair. Pengujian dilakukan terhadap lima kombinasi campuran beton berpori, terdiri atas beton kontrol (tanpa bahan tambah) dan variasi campuran yang mengandung abu sekam padi (RHA) sebesar 10% dan 15% dari berat semen, serta serat kelapa sebesar 1% dari total berat campuran. Setiap parameter diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk mengevaluasi perkembangan sifat mekanik dan fisik secara temporal. Metode pengujian mengikuti standar ASTM dan SNI yang relevan, dengan pendekatan deskriptif dan komparatif dalam analisis data. Hal ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan kinerja beton akibat pengaruh masing-masing bahan tambahan, baik secara individu maupun gabungan, sehingga dapat diketahui komposisi optimal yang memberikan keseimbangan antara isolasi termal, kekuatan, dan durabilitas beton berpori.

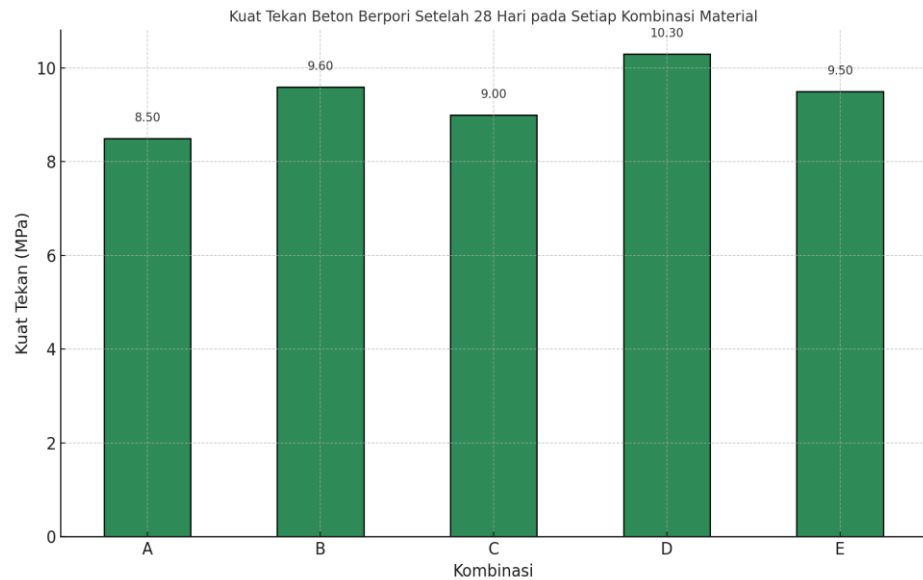
3.1 Uji Slump (*Workability*)



Gambar 2. Grafik Pengujian *Workability*

Grafik menunjukkan Kombinasi A (tanpa bahan tambah) menunjukkan nilai slump tertinggi yaitu 25 mm, yang mengindikasikan tingkat kelecakan tinggi. Penambahan 10% RHA saja (B) menurunkan slump menjadi 20 mm, karena sifat RHA yang menyerap air. Penambahan 1% serat kelapa saja (C) menurunkan slump ke 19 mm, karena serat menciptakan hambatan mekanik terhadap aliran campuran. Kombinasi D dan E yang mencampur keduanya menghasilkan nilai slump 17 mm dan 16 mm, menunjukkan efek kumulatif terhadap kekakuan campuran. Terjadi penurunan nilai slump sebesar 36% dari kombinasi A ke E, yang menandakan bahwa kombinasi RHA dan serat kelapa mengurangi workability secara signifikan. Namun demikian, nilai slump masih berada dalam kisaran dapat diterima untuk beton berpori, yang memang tidak membutuhkan slump tinggi.

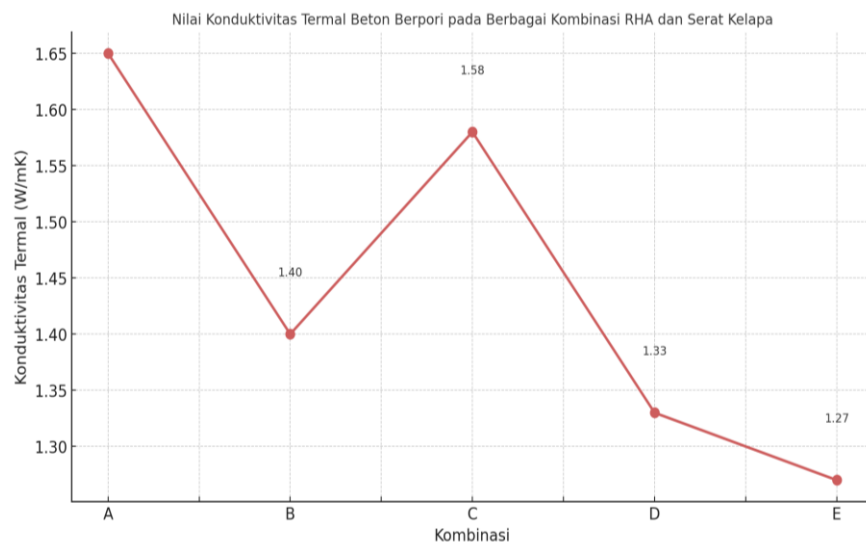
3.2 Uji Kuat Tekan Beton



Gambar 3.. Grafik Pengujian Kuat Tekan Beton

Kombinasi A menghasilkan kuat tekan 8,5 MPa. Kombinasi B (RHA 10%) naik menjadi 9,2 MPa (+8,2%), karena aktivitas pozzolanik RHA. Kombinasi C (Serat 1%) naik ke 9,6 MPa (+12,9%), menunjukkan efek penguatan mikromekanik. Kombinasi D (RHA 10% + Serat 1%) menghasilkan nilai maksimum 10,3 MPa (+21,2%), menunjukkan efek sinergis keduanya. Kombinasi E (RHA 15% + Serat 1%) justru turun ke 9,7 MPa, menunjukkan bahwa kelebihan RHA mungkin menyebabkan gangguan rasio air-semen efektif atau overfilling. Kombinasi D merupakan komposisi optimum untuk kekuatan, dengan kenaikan signifikan dibanding beton kontrol. membuktikan sinergi antara aktivitas pozzolanik RHA dan efek bridging serat. Penambahan RHA hingga 15% menurunkan kekuatan, menunjukkan adanya batas optimum pemakaian bahan tambah.

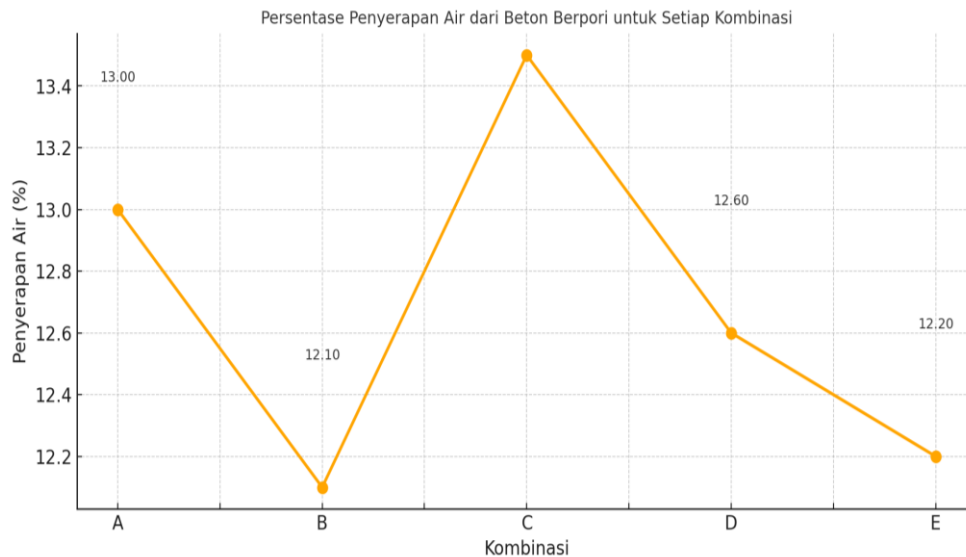
3.3 Uji Konduktivitas Termal



Gambar 4. Grafik Pengujian Konduktivitas Termal

Kombinasi A memiliki konduktivitas termal tertinggi yaitu $1,65 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Kombinasi B dan C menunjukkan penurunan ke $1,54$ dan $1,49$, masing-masing akibat penambahan RHA dan serat kelapa secara terpisah. Kombinasi D dan E menunjukkan penurunan paling signifikan $1,32 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ dan $1,27 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, yaitu penurunan sekitar 23% dari beton kontrol. Kombinasi E (RHA 15% + Serat 1%) memiliki konduktivitas termal terendah, menunjukkan performa terbaik dalam aspek insulasi termal. Penambahan kedua bahan terbukti efektif dalam meningkatkan kemampuan isolasi panas beton berpori.

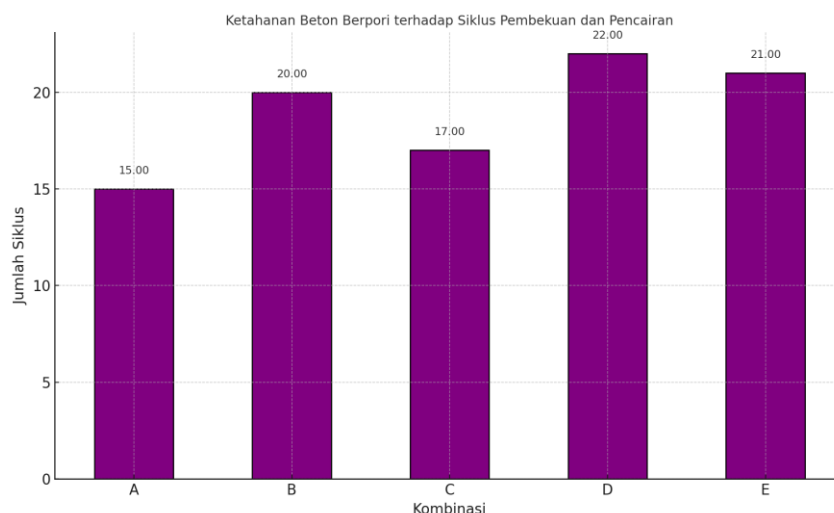
3.4 Penyerapan Air



Gambar 5. Grafik Pengujian Penyerapan Air

Kombinasi C menunjukkan penyerapan tertinggi (13,5%) akibat porositas makro yang dihasilkan oleh serat kelapa. Kombinasi B dan E menunjukkan penurunan penyerapan dibanding beton kontrol, yaitu 12,1% dan 12,2%. Kombinasi D tetap tinggi di 12,6%, karena efek gabungan belum sepenuhnya menutup porositas. Penambahan serat saja meningkatkan penyerapan, namun dikombinasikan dengan RHA bisa dikendalikan. Kombinasi B adalah yang paling efektif dalam mengurangi penyerapan air secara absolut.

3.5 Ketahanan Siklus Beku Cair



Gambar 6. Grafik Pengujian Siklus Beku Cair

Kombinasi A hanya mampu bertahan 15 siklus. Penambahan RHA (B) meningkatkan ketahanan menjadi 17 siklus. Penambahan serat (C) lebih signifikan, mencapai 20 siklus. Kombinasi D dan E memberikan hasil terbaik: 22 dan 21 siklus, menandakan performa durability yang sangat baik. Kombinasi D kembali menunjukkan performa terbaik. Serat kelapa terbukti lebih dominan dalam memperkuat ketahanan beku-cair dibanding RHA sendiri. Kombinasi D (RHA 10% + Serat 1%) menunjukkan ketahanan tertinggi terhadap siklus beku-cair. Kehadiran serat efektif menahan mikro-retakan, dan RHA membantu menutup pori mikro, menghambat tekanan air saat pembekuan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan maka di peroleh beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Nilai slump menurun seiring penambahan abu sekam padi (RHA) dan serat kelapa, dari 25 mm pada campuran tanpa bahan tambah menjadi 16 mm pada campuran dengan RHA 15% dan serat 1%. RHA menyerap lebih banyak air karena permukaannya yang halus dan berpori, sedangkan serat kelapa meningkatkan viskositas campuran. Untuk menjaga workability, disarankan penyesuaian rasio air-semen atau penggunaan bahan tambahan seperti superplasticizer.
2. Kuat tekan meningkat secara signifikan pada kombinasi RHA 10% dan serat kelapa 1%, dengan nilai maksimum mencapai 10,3 MPa, dibandingkan 8,5 MPa pada kontrol Reaksi pozzolanik dari RHA menghasilkan lebih banyak senyawa kalsium silikat yang dihidrasi, yang meningkatkan kekuatan struktur mikro beton. Serat kelapa memperkuat ketahanan tarik internal dan menahan retakan. Kombinasi RHA 10% dan serat 1% terbukti optimal dalam meningkatkan performa mekanis beton berpori dan cocok untuk struktur non-struktural dengan kebutuhan kekuatan menengah.
3. Nilai konduktivitas termal menurun dari 1,65 W/m·K pada beton kontrol menjadi 1,27 W/m·K pada kombinasi RHA 15% dan serat 1%. Porositas tambahan dari serat serta sifat isolatif RHA menghambat aliran panas dalam material. Campuran dengan RHA dan serat sangat potensial diterapkan pada bangunan tropis atau rumah hemat energi yang membutuhkan material berinsulasi tinggi.
4. Penyerapan air tertinggi terjadi pada beton dengan serat kelapa 1%, yaitu 13,5%, sedangkan nilai terendah 12,1% tercapai pada beton dengan RHA 10% tanpa serat. Serat kelapa menciptakan saluran kapiler yang meningkatkan konektivitas pori. Sebaliknya, RHA mengisi pori-pori mikro, sehingga menurunkan daya serap. Penggunaan RHA tanpa serat direkomendasikan untuk mengurangi daya serap air pada beton berpori yang digunakan di area rawan kelembaban tinggi.
5. Kombinasi RHA 10% dan serat 1% memberikan ketahanan tertinggi, mampu menahan hingga 22 siklus beku-cair, dibandingkan 15 siklus pada beton kontrol. Serat meningkatkan fleksibilitas dan ketahanan terhadap retak akibat ekspansi air yang membeku. RHA memperbaiki ikatan mikrostruktur beton. Kombinasi ini sangat cocok untuk aplikasi di daerah dengan fluktuasi suhu ekstrem, seperti kawasan dataran tinggi atau area terbuka.
6. Kombinasi abu sekam padi 10% dan serat kelapa 1% merupakan formulasi paling seimbang, menghasilkan peningkatan kuat tekan, penurunan konduktivitas termal, serta ketahanan beku-cair terbaik, dengan workability dan penyerapan air yang masih dalam batas toleransi. Komposisi ini direkomendasikan untuk pengembangan beton berpori ramah lingkungan dengan performa termal dan mekanis optimal.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan kekuatan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan secara mandiri. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan semangat selama proses ini. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat dan dapat menjadi referensi bagi yang membutuhkan.

6. REFERENCES

- Analisis suhu ruang pemanfaatan serabut kelapa.* (n.d.).
Buku Struktur Beton 1. (n.d.).
- Chen, L., Huang, L., Hua, J., Chen, Z., Wei, L., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., Dong, L., & Yap, P.-S. (2023). Green construction for low-carbon cities: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1627–1657. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01544-4>
- 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>
- Fahrudin, A. (n.d.). *Buku Ajar Perpindahan Panas heat sink dan permukaan bersirip.* *High Strength Concrete.* (n.d.).
- Laia, Y., Hutabarat, L. E., & Tampubolon, S. P. (2023). Compressive strength characteristic of fly ash light concrete mixture using artificial light weight aggregate (ALWA). *AIP Conference Proceedings*, 2689, 040006. <https://doi.org/10.1063/5.0114932>
- Lubis, N. A., & Putri, M. D. (2024). Teknologi Nano Dari Bahan Alam Sebagai Prospek Penerapan Konstruksi Berkelanjutan. *International Journal of Science, Technology and Applications*, 2(2), 102–119. <https://doi.org/10.70115/ijsta.v2i2.232>
- Mawardi, I., Rizal, S., Aprilia, S., & Faisal, M. (n.d.). *Kajian stabilitas termal bahan baku material insulasi panas berbasis serat alam: Kayu kelapa sawit dan serat rami.*
- 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 Pozzolan Material in Concrete. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 6(1), 115–124. <https://doi.org/10.37253/jcep.v6i1.10399>
- Prasetyo, A. (n.d.). *(The Effect of Fly Ash In Brickwork On Compressive Strength, Water Absorption And Thermal Insulation).*
- Rommel, E., Rusdianto, Y., Utari, R. P., & Riyanto, A. S. (2017). Pengaruh Pemakaian Fly-Ash Terhadap Karakteristik Beton Busa (Tinjauan Pada Konduktivitas Termal Dan Sound Absorption Beton).
- Setiawan, F. (2022). *Pengaruh Variasi waktu Proses Hot Dipping Alumunizing Coating Stainless Steel 304 Terhadap Karakteristik Material dan Konduktivitas Termal.*
- Simanjuntak, I. V., & Tampubolon, S. P. (2022). Pengaruh Variasi Agregat Kasar Penyusun Beton Porous Terhadap Kuat Tekan dan Porositas Beton. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil dan Lingkungan - CENTECH*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.33541/cen.v3i1.3966>
- Siregar, R. A., Hutabarat, L. E., Tampubolon, S. P., & Purnomo, C. C. (2021). Optimizing Empty Fruit Bunch (EFB) of palm and glass powder as a partial substitution material of fine aggregate to increase compressive and tensile strength of normal concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 878(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/878/1/012047>

- Sulfianty, S., Nurhayati, N., & Subaer, S. (2020). Studi Tentang Konduktivitas dan Resistansi Termal Geopolimer Berpori Berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 16(2), 161. <https://doi.org/10.35580/jspf.v16i2.15983>
- Tajalla, G. U. N., Andriansyah, P., Riyadi, I. T., Vadila, M. L. N., & Laksono, A. D. (2024). Karakteristik Termal Material Komposit Berbahan Dasar Polipropilena dan Batang Pisang. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, 23(1), 41–49. <https://doi.org/10.55893/jt.vol23no1.554>
- Tampubolon, S. P., Lase, F. J., Sudarwani, M. M., Sari, D., Nataldo, B. T., & David, C. (2024). Pengembangan Usaha Mandiri Masyarakat Desa Srimahi Kecamatan Tambun Utara Dengan Pemanfaatan Limbah Sekam Padi Sebagai Campuran Beton Paving Block Dan Batako. *Jurnal Abdi Insani*, 11(4), 2507–2516. <https://doi.org/10.29303/abdiinsani.v11i4.2150>
- Tang, S., Wang, Y., Geng, Z., Xu, X., Yu, W., A, H., & Chen, J. (2021). Structure, Fractality, Mechanics and Durability of Calcium Silicate Hydrates. *Fractal and Fractional*, 5(2), 47. <https://doi.org/10.3390/fractalfract5020047>
- Zalukhu, P. S., Irwan, I., & Hutaeruk, D. M. (2017). Pengaruh Penambahan Serat Sabut Kelapa (Cocofiber) terhadap Campuran Beton sebagai Peredam Suara. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, BUILDING AND TRANSPORTATION*, 1(1), 27. <https://doi.org/10.31289/jcebt.v1i1.367>