

Contents list available at journal.uib.ac.id

Journal of Civil Engineering and Planning
Journal homepage: <https://journal.uib.ac.id/index.php/jce>



Jurnal Penelitian

Studi Literatur Potensi Abu Sekam Padi sebagai Bahan Pozzolan Lokal dalam Beton

Literature Study on the Potential of Rice Husk Ash as a Local Pozzolan Material in Concrete

Mitsaq Addina Nisa¹, Anсадilla Niar Sitanggang²

¹D3 Konstruksi Gedung, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta

²Rekayasa Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Esa Unggul

Email korespondensi: mitsaq.addina.nisa@sipil.pnj.ac.id ansadilla@esaunggul.ac.id

INFO ARTIKEL

Kata kunci :

beton, abu sekam padi, pozzolan, kuat tekan, durabilitas

ABSTRAK

Produksi semen sebagai bahan utama dalam pembuatan beton memberikan kontribusi besar terhadap emisi karbon global. Untuk mengurangi dampak tersebut, salah satu solusi yang dikembangkan adalah penggunaan bahan *pozzolan* alami maupun buatan sebagai substitusi sebagian semen. Abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) merupakan limbah pertanian yang mengandung silika amorf tinggi dan berpotensi besar sebagai bahan *pozzolan* lokal di Indonesia. Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan RHA dalam rentang 10–20% mampu meningkatkan kuat tekan dan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif. Efektivitas RHA sangat dipengaruhi oleh tingkat kehalusan partikel dan proses pembakaran. Dengan mempertimbangkan ketersediaan dan dampak lingkungannya, RHA memiliki potensi besar sebagai solusi material ramah lingkungan dalam konstruksi berbasis sumber daya lokal

ARTICLE INFO

Keywords:

concrete, rice husk ash, pozzolan, compressive strength, durability

ABSTRACT

The production of cement, as the primary material in concrete manufacturing, significantly contributes to global carbon emissions. To mitigate this impact, one of the solutions being developed is the use of natural or artificial pozzolanic materials as partial substitutes for cement. Rice Husk Ash (RHA) is an agricultural waste rich in amorphous silica and holds great potential as a local pozzolanic material in Indonesia. The review results show that using RHA in the range of 10–20% can enhance the compressive strength and improve concrete resistance to aggressive environments. The effectiveness of RHA is highly influenced by the fineness of its particles and the combustion process. Considering its availability and environmental impact, RHA has great potential as an eco-friendly material solution for construction based on local resources.

1. Pendahuluan

Perkembangan pesat industri konstruksi telah memberikan kontribusi signifikan terhadap kemajuan infrastruktur global. Namun, di balik manfaatnya, sektor ini juga menjadi salah satu penyumbang utama emisi karbon, terutama akibat tingginya konsumsi semen Portland sebagai bahan pengikat utama dalam beton. Produksi semen secara global menyumbang sekitar 7–8% emisi karbon dioksida (CO₂) dunia, menjadikannya salah satu sektor industri dengan jejak karbon terbesar.

Kondisi ini mendorong pencarian solusi alternatif yang dapat mengurangi ketergantungan terhadap semen konvensional, tanpa mengorbankan performa teknis beton. Salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah pemanfaatan bahan *pozzolan* — baik alami maupun buatan — sebagai substitusi parsial semen dalam campuran beton. Penggunaan *pozzolan* terbukti mampu meningkatkan kinerja beton dari aspek kuat tekan, durabilitas, dan ketahanan terhadap lingkungan agresif, sekaligus menurunkan emisi karbon dan biaya produksi.

Di tengah tantangan lingkungan dan kebutuhan akan material berkelanjutan, Indonesia sebagai negara agraris memiliki potensi besar dalam menyediakan bahan alternatif tersebut. Salah satunya adalah abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*), limbah pertanian yang melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal. RHA mengandung silika amorf tinggi yang menjadikannya kandidat kuat sebagai bahan *pozzolan* lokal. Potensi ini semakin menjanjikan mengingat ketersediaannya yang luas di daerah penghasil padi seperti Jawa, Sumatera, dan Sulawesi.

Perlunya evaluasi sistematis terhadap potensi dan efektivitas RHA sebagai bahan substitusi semen dalam beton, baik dari sisi teknis, ekonomi, maupun lingkungan. Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan hasil yang menjanjikan, namun belum ada pendekatan komprehensif yang mengkaji berbagai aspek penggunaan RHA dalam beton secara terpadu berdasarkan hasil studi literatur yang terkini.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengulas dan menganalisis secara kritis hasil-hasil penelitian terdahulu mengenai penggunaan RHA dalam beton, dengan fokus pada karakteristik material, pengaruhnya terhadap kuat tekan dan durabilitas beton, serta faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitasnya. Kajian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan standar pemanfaatan RHA sebagai bahan *pozzolan* lokal di Indonesia serta mendukung inisiatif pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Beton dan Komponennya

Beton merupakan material komposit yang umum digunakan dalam konstruksi, tersusun atas semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambahan. Semen berperan sebagai bahan pengikat yang bereaksi dengan air melalui proses hidrasi untuk membentuk pasta semen yang mengikat agregat menjadi massa yang keras dan kuat (Patel & Shah, 2020). Agregat memberikan volume, kestabilan dimensi, serta kekuatan mekanis, sedangkan air memicu reaksi kimia dan mempengaruhi *workability* beton (Rahman et al., 2018). Komponen utama beton meliputi:

1. Semen: Berfungsi sebagai bahan pengikat yang bereaksi dengan air untuk membentuk pasta yang mengikat agregat.
2. Air: Memicu reaksi kimia dengan semen (hidrasi) dan memberikan kelecakan pada campuran beton.
3. Agregat Halus dan Kasar: Memberikan volume dan kekuatan pada beton serta mengurangi penyusutan.
4. Bahan Tambahan (*Admixtures*): Digunakan untuk memodifikasi sifat-sifat beton, seperti mempercepat atau memperlambat waktu pengerasan, meningkatkan kelecakan, dan meningkatkan durabilitas.

Pemilihan dan proporsi yang tepat dari komponen-komponen ini sangat penting untuk menghasilkan beton dengan kualitas yang diinginkan (Demix, 2023). Menurut SNI 03-2847-2002, semen Portland atau semen hidrolik, agregat kasar, agregat halus, dan air serta tambahan bahan kimia yang membentuk suatu benda padat dalam suatu adukan disebut sebagai definisi beton (Hariati et al, 2020).

Penelitian sebelumnya (Nadjwa et al, 2024) membahas tentang inovasi baru dalam penggunaan material beton terus bermunculan. Material-material berbahan dasar alami, maupun limbah menjadi bahan utama. Hal ini dikarenakan potensi bahan digunakan dalam beton, dan penambahan untuk mendapatkan bahan produksi beton sering kali menyebabkan kerusakan lingkungan. Sehingga, pemanfaatan limbah sebagai bahan campuran beton yang ramah lingkungan merupakan solusi untuk mengurangi penggunaan material beton (Jaya, 2022).

2.2 Konsep Bahan *Pozzolan* dan Jenis-Jenisnya

Pozzolan adalah bahan yang mengandung silika reaktif tinggi yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), hasil samping reaksi hidrasi semen, untuk membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan ketahanan beton (Thomas & Jennings, 2019). Jenis *pozzolan* dibedakan menjadi alami, seperti tanah *diatom* dan tuf, serta buatan, seperti fly ash, slag, dan abu sekam padi. Penggunaan *pozzolan* terbukti mengurangi porositas beton, meningkatkan ketahanan terhadap serangan sulfat, serta menurunkan emisi karbon (Amin, 2021). Menurut SNI 2460:2014 *Pozzolan* adalah bahan yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang, meskipun tidak memiliki sifat semen sendiri, dapat bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pada kondisi kelembaban dan suhu tertentu untuk membentuk senyawa yang memiliki sifat pengikat (C-S-H), mirip dengan yang terbentuk dalam hidrasi semen. Penggunaan *pozzolan* dalam campuran beton dapat meningkatkan durabilitas, mengurangi panas hidrasi, dan mengurangi biaya produksi dengan menggantikan sebagian semen.

Pozzolan dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu:

1. *Pozzolan* alami, seperti tanah *diatom* dan abu vulkanik.
2. *Pozzolan* buatan, seperti abu terbang (*fly ash*), *silica fume*, *slag*, dan abu sekam padi (RHA)

Sedangkan menurut ASTM C618 2019, *pozzolan* diklasifikasikan dalam *Class N* (alami), *Class F* dan *Class C* (buatan), tergantung pada komposisi kimianya.

2.3. Studi Terdahulu tentang RHA dalam Beton

Sejumlah penelitian dalam satu dekade terakhir telah mengkaji secara mendalam pengaruh penggunaan abu sekam padi (RHA) terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton. Secara umum, hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa RHA dapat menjadi bahan *pozzolan* yang efektif, terutama jika digunakan dalam proporsi dan kondisi yang tepat. Berikut adalah beberapa studi terdahulu yang relevan:

1. Li et al. (2023) meneliti prediksi kuat tekan beton dengan RHA menggunakan model jaringan saraf tiruan (ANN). Hasil menunjukkan bahwa pada penggunaan 15% RHA, kuat tekan beton meningkat secara signifikan, dan model prediksi memiliki tingkat akurasi tinggi ($R^2 = 0,97$) (Li et al., 2023).
2. Ma et al. (2023) mengevaluasi sifat mekanik beton dengan RHA sebagai pengganti sebagian semen. Hasil menunjukkan peningkatan kekuatan tekan sebesar 10–20% pada umur 28 dan 56 hari, terutama dengan RHA berukuran halus (Ma et al., 2023).
3. Gastaldini et al. (2024) meneliti pengaruh kombinasi RHA, serat karet, dan mikrosilika terhadap daya tahan beton terhadap erosi dan lingkungan agresif. Hasilnya menunjukkan bahwa beton dengan RHA memiliki ketahanan erosi yang sangat baik dan struktur mikro yang padat (Gastaldini et al., 2024).
4. Nisar dan Bhat (2021) mengevaluasi ketahanan beton terhadap karbonasi dan korosi dengan penambahan RHA. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RHA sebesar 10–20% dapat meningkatkan ketahanan terhadap serangan karbonasi dan *ion* klorida, terutama jika dikombinasikan dengan inhibitor korosi (Nisar & Bhat, 2021).
5. Haruna et al. (2021) membandingkan dua model kecerdasan buatan (EANN dan FFNN) untuk memprediksi kekuatan beton dengan RHA. Hasil eksperimen memperlihatkan bahwa kekuatan beton meningkat hingga 15% pada kadar RHA optimal, serta bahwa model EANN lebih akurat dalam prediksi (Haruna et al., 2021).
6. Penambahan abu sekam padi (ASP) sebagai bahan substitusi semen dalam campuran beton menunjukkan peningkatan kuat tekan hingga 12% pada umur 28 hari dibandingkan dengan beton normal, khususnya pada kadar penggantian 15% (Sari et al, 2019)
7. Salas Montoya et al. (2023) mempelajari beton performa tinggi dengan kombinasi RHA reaktif tinggi dan *silica fume*. Hasil menunjukkan bahwa kombinasi tersebut menghasilkan kuat tekan >45 MPa dan durabilitas tinggi terhadap sulfat dan klorida (Salas Montoya et al., 2023).
8. Nnadi et al. (2023) melakukan analisis komprehensif terhadap pengaruh kandungan RHA terhadap kuat tekan beton. Mereka menemukan bahwa penambahan RHA $>20\%$ menurunkan kekuatan tekan, namun kadar 10–15% tetap memberikan performa optimal serta durabilitas baik (Nnadi et al., 2023).

Hasil-hasil tersebut menegaskan bahwa RHA berpotensi besar sebagai bahan substitusi semen yang ramah lingkungan dan ekonomis, dengan performa teknis yang bersaing jika digunakan secara tepat.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode studi literatur (*library research*) yang bersifat kualitatif deskriptif, tanpa melibatkan kegiatan eksperimen langsung di laboratorium seperti uji kuat tekan, uji tarik belah, atau uji durabilitas beton. Tujuan utama dari pendekatan ini adalah untuk mengkaji, mengumpulkan, dan menganalisis berbagai hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan pemanfaatan abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) sebagai bahan *pozzolan* pengganti parsial semen dalam campuran beton. Dengan memanfaatkan data sekunder dari sumber-sumber ilmiah terpercaya, penelitian ini menyajikan sintesis komprehensif atas temuan-temuan sebelumnya dalam konteks kekuatan mekanik (terutama kuat tekan), ketahanan terhadap lingkungan agresif (durabilitas), serta efisiensi penggunaan RHA dibandingkan dengan bahan *pozzolan* lainnya.

Sumber data yang digunakan meliputi jurnal-jurnal ilmiah nasional dan internasional yang telah terakreditasi, seperti yang terindeks di *Scopus* dan *Sinta*, buku-buku referensi teknik sipil dan teknologi beton, dokumen standar resmi seperti ASTM, SNI, dan ACI. Pemilihan literatur difokuskan pada publikasi yang terbit dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir agar hasil kajian tetap aktual dan relevan dengan perkembangan terkini di bidang teknologi material beton.

Teknik pengumpulan data dilakukan dengan cara penelusuran artikel ilmiah melalui basis data daring seperti *Google Scholar*, *ScienceDirect*, dan *ResearchGate*, kemudian dilanjutkan dengan proses penyaringan berdasarkan kriteria topikalitas, kualitas metodologi, dan signifikansi hasil. Informasi yang diperoleh diklasifikasikan berdasarkan beberapa aspek utama, yaitu: karakteristik fisikokimia abu sekam padi, pengaruh RHA terhadap kuat tekan dan durabilitas beton, kondisi dan parameter optimal penggunaan RHA, serta perbandingan performa RHA dengan jenis *pozzolan* lain seperti *fly ash* dan *slag*. Untuk menganalisis data yang dikumpulkan, digunakan pendekatan komparatif dan evaluatif, yakni dengan membandingkan berbagai hasil penelitian terkait parameter-parameter teknis utama (seperti persentase substitusi RHA, kehalusan partikel, suhu pembakaran, dan metode *curing*) dan mengevaluasi bagaimana variabel-variabel tersebut memengaruhi performa beton. Melalui pendekatan ini, penelitian dapat menarik kesimpulan yang berbasis bukti mengenai potensi RHA sebagai bahan *pozzolan* lokal yang ramah lingkungan dan layak digunakan dalam konstruksi berkelanjutan di Indonesia.

Dengan demikian, meskipun tidak melibatkan pengujian laboratorium secara langsung, penelitian ini tetap memiliki kekuatan analitis yang tinggi karena merangkum dan mengkritisi berbagai studi eksperimental terdahulu, serta memberikan landasan konseptual dan praktis bagi pengembangan lebih lanjut material beton berbasis RHA.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Abu Sekam Padi (Rice Husk Ash – RHA)

Sekam padi adalah limbah pertanian yang dihasilkan dari proses penggilingan padi. Pembakaran sekam padi pada suhu tertentu menghasilkan abu sekam padi (RHA), yang kaya akan silika amorf. Proses pembakaran harus dikendalikan pada suhu sekitar 500–700°C untuk menghasilkan RHA dengan kandungan silika amorf yang tinggi, yang memiliki reaktivitas *pozzolan* yang baik (Zhang et al., 2023). Suhu dan waktu pembakaran sangat mempengaruhi komposisi kimia dan struktur silika dalam RHA. Pembakaran pada suhu terlalu tinggi dapat mengubah silika amorf menjadi bentuk kristalin yang kurang reaktif (Irawan et al., 2020).

RHA mengandung sekitar 85–95% silika (SiO_2), tergantung pada kondisi pembakaran. Selain silika, RHA juga mengandung senyawa oksida lainnya seperti Al_2O_3 dan Fe_2O_3 . Aktivitas *pozzolan* dari RHA bergantung pada kehalusan partikel dan metode pembakaran yang digunakan (Napitupulu & Simanjuntak, 2023). Selain itu, RHA memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi dan porositas yang baik, yang meningkatkan aktivitas *pozzolan* dan kemampuan untuk mengisi pori-pori dalam beton, sehingga meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton (Zhang et al., 2023).

4.2. Peran RHA sebagai Bahan Substitusi Semen

Penggunaan RHA sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam beton telah terbukti meningkatkan kekuatan tekan, mengurangi permeabilitas, dan meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia. Studi menunjukkan bahwa penggantian semen dengan RHA hingga 20% dapat meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton secara signifikan (Zhang et al., 2023). Studi menunjukkan bahwa RHA mampu meningkatkan kekuatan tekan dan ketahanan beton terhadap serangan kimia, terutama pada kadar substitusi 10–15% (Li et al., 2023).

Selain itu, RHA juga berperan dalam menurunkan porositas dan permeabilitas beton, sehingga meningkatkan durabilitas (Nisar & Bhat, 2021). Secara lingkungan, pemanfaatan RHA dapat mengurangi limbah pertanian dan emisi CO₂ dari produksi semen (Aziz et al., 2022).

4.3. Pengaruh RHA terhadap Kuat Tekan dan Durabilitas Beton

Rice Husk Ash (RHA) terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton, tergantung pada persentase substitusi, tingkat kehalusan abu, serta umur pengujian beton. Sebagian besar studi menunjukkan bahwa penggunaan RHA dalam kisaran 10–15% sebagai pengganti parsial semen dapat meningkatkan atau mempertahankan kuat tekan beton pada umur 28 hingga 90 hari. Penggunaan abu sekam padi sebagai bahan pozzolan dalam beton tidak hanya meningkatkan kuat tekan, tetapi juga memperbaiki durabilitas beton terhadap lingkungan agresif, seperti sulfat dan klorida (Hariati et al., 2020).

Li et al. (2023) menunjukkan bahwa kuat tekan beton meningkat secara optimal pada kadar RHA 15%, dengan nilai mencapai lebih dari 40 MPa pada umur 28 hari, terutama ketika digunakan dalam bentuk yang telah diolah menjadi sangat halus (Li et al., 2023). Studi lainnya oleh Nisar dan Bhat (2021) juga mendukung temuan ini, di mana pada penggantian semen sebesar 10–15%, kuat tekan meningkat hingga 12% dibandingkan beton normal (Nisar & Bhat, 2021).

Gastaldini et al. (2024) dalam studinya menunjukkan bahwa RHA berperan dalam mengisi pori-pori mikro dan bereaksi *pozzolan* dengan kalsium hidroksida, menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang memperkuat struktur beton (Gastaldini et al., 2024). Hal ini diperkuat oleh Ma et al. (2023) yang menyatakan bahwa pada umur 56 hari, beton dengan 15% RHA menunjukkan peningkatan kekuatan hingga 20% dibandingkan beton kontrol (Ma et al., 2023).

Namun, penggunaan RHA dalam jumlah yang terlalu tinggi (>20%) cenderung menurunkan kekuatan tekan karena berkurangnya kandungan semen sebagai sumber utama kalsium hidroksida yang dibutuhkan untuk reaksi *pozzolan* (Nnadi et al., 2023). Haruna et al. (2021) menambahkan bahwa peningkatan kekuatan lebih terlihat pada umur beton yang lebih tua (56–90 hari), karena reaksi pozzolan dari RHA berlangsung lambat dibandingkan hidrasi semen biasa (Haruna et al., 2021). Secara umum, pemanfaatan RHA dalam komposisi optimal tidak hanya mendukung performa mekanik beton, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan dengan mengurangi konsumsi semen dan pemanfaatan limbah pertanian.

4.4. Faktor yang Mempengaruhi Efektivitas RHA

Beberapa faktor yang mempengaruhi efektivitas RHA sebagai bahan substitusi semen antara lain:

1. Kadar Substitusi: Penggantian semen dengan RHA dalam jumlah optimal, umumnya 10–15%, terbukti meningkatkan kuat tekan dan ketahanan beton. Melebihi kadar ini justru dapat menurunkan kekuatan karena berkurangnya ketersediaan kalsium hidroksida (Li et al., 2023; Amin, 2021).
2. Kehalusan RHA: RHA yang sangat halus memiliki luas permukaan lebih besar dan meningkatkan reaktivitas *pozzolan*. Partikel halus meningkatkan densitas pasta semen dan mempercepat pembentukan C-S-H (Nisar & Bhat, 2021).

3. Suhu dan Durasi Pembakaran: RHA yang dihasilkan pada suhu 500–700°C memiliki kandungan silika amorf lebih tinggi dan aktivitas pozzolan lebih baik. Pembakaran berlebih menghasilkan silika kristalin yang kurang reaktif (Setiawan et al., 2022).
4. Kondisi *Curing*: Proses *curing* yang optimal meningkatkan reaksi antara silika dalam RHA dan Ca(OH)_2 , sehingga pembentukan C-S-H menjadi lebih maksimal (Rahman et al., 2018).

4.5. Keunggulan dan Keterbatasan Dibandingkan dengan Bahan Pozzolan Lain

Jika dibandingkan dengan *fly ash* dan GGBFS (*Ground Granulated Blast Furnace Slag*), RHA memiliki aktivitas *pozzolan* yang tinggi karena kandungan silikanya yang dominan dalam bentuk amorf. Namun, *fly ash* lebih stabil dari sisi produksi dan distribusi karena berasal dari industri besar seperti PLTU.

GGBFS memberikan kekuatan tinggi jangka panjang, tetapi lebih sulit diperoleh di wilayah non-industri. Di sisi lain, RHA memiliki keunggulan dari segi ketersediaan lokal dan biaya produksi yang lebih rendah, sehingga sangat potensial untuk dikembangkan di wilayah pedesaan.

Keunggulan RHA dibandingkan dengan bahan pozzolan Lain antara lain:

1. Kandungan Silika Amorf yang Tinggi dan Reaktif
RHA yang dibakar pada suhu terkendali mengandung silika amorf yang sangat reaktif, sehingga berfungsi efektif sebagai bahan pozzolan yang meningkatkan kuat tekan beton. Dalam penelitian Alsaed & Al Mufti (2024), disebutkan bahwa kandungan SiO_2 dalam RHA mencapai lebih dari 80%, memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan beton jangka panjang. (Alsaed & Al Mufti, 2024)
2. Meningkatkan Durabilitas Beton
Penggunaan RHA terbukti meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi ion klorida dan sulfat serta menurunkan porositas beton. Marangu et al. (2024) menunjukkan bahwa beton dengan RHA menunjukkan penurunan permeabilitas air dan peningkatan resistensi terhadap serangan kimia. (Marangu et al., 2024)
3. Ramah Lingkungan dan Mengurangi Emisi CO_2
RHA berasal dari limbah pertanian yang tersedia melimpah dan dapat menggantikan sebagian semen Portland, sehingga mengurangi emisi karbon. Studi oleh Hasan et al. (2022) mengonfirmasi bahwa penggantian semen hingga 20% dengan RHA dapat mengurangi jejak karbon beton secara signifikan. (Hasan et al., 2022)
4. Ketersediaan Lokal dan Biaya Rendah
Di negara agraris seperti Indonesia, sekam padi merupakan limbah yang melimpah dan murah. RHA bisa diperoleh dengan biaya rendah sehingga menjadikannya alternatif ekonomis dalam industri konstruksi berkelanjutan. (Amran et al., 2021)

Sedangkan keterbatasan RHA dibandingkan dengan bahan pozzolan Lain antara lain :

1. Variabilitas Mutu Tergantung Proses Pembakaran
Mutu RHA sangat dipengaruhi oleh metode dan suhu pembakaran. Silika amorf hanya terbentuk pada rentang suhu tertentu (~500–700 °C). Jika pembakaran terlalu tinggi atau tidak merata, akan terbentuk silika kristalin yang tidak reaktif. (Amran et al., 2021)
2. Menurunkan Workability Campuran Beton
RHA memiliki luas permukaan spesifik tinggi yang meningkatkan kebutuhan air dalam adukan, sehingga menurunkan workability beton jika tidak dibarengi dengan penggunaan *superplasticizer*. Hal ini dilaporkan dalam studi Alsaed & Al Mufti (2024), yang menunjukkan penurunan *slump* pada beton dengan substitusi RHA. (Alsaed & Al Mufti, 2024)
3. Perlu Penggilingan Tambahan untuk Performa Optimal

Agar efektif sebagai bahan pengganti semen, RHA memerlukan proses penggilingan lanjutan untuk mencapai kehalusan yang sebanding dengan semen. Tanpa proses ini, efisiensi pozzolanik RHA akan menurun. (Hasan et al., 2022)

Tabel 1 Keunggulan dan Keterbatasan RHA

No.	Keunggulan	Keterbatasan
1	Kandungan silika tinggi dan reaktif (<i>amorf</i>)	Variabilitas mutu tergantung proses pembakaran.
2	Mengurangi kebutuhan semen → menurunkan emisi CO ₂	Perlu penggilingan tambahan untuk hasil terbaik.
3	Meningkatkan durabilitas beton.	Menurunkan <i>workability</i> tanpa penambahan bahan kimia tambahan.
4	Merupakan limbah pertanian → murah dan berlimpah di Indonesia.	Kurangnya standarisasi nasional untuk pemanfaatan skala besar.

Sumber : Sayed et al, 2023

4.6. Potensi Pengembangan dan Aplikasi RHA di Indonesia

Sebagai negara agraris, Indonesia menghasilkan jutaan ton sekam padi setiap tahun. Limbah ini sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, pemanfaatan RHA sebagai bahan pengganti parsial semen sangat relevan untuk:

1. Menekan biaya konstruksi di daerah pedesaan.
2. Mendukung pembangunan berkelanjutan dan ramah lingkungan.
3. Mendorong ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah lokal.

Pengembangan RHA di Indonesia dapat dilakukan melalui sinergi antara pemerintah, akademisi, dan industri lokal. Perlu adanya riset lanjutan untuk standarisasi dan pelatihan teknis di lapangan agar RHA dapat digunakan secara luas di sektor konstruksi.

Tabel 2 Ringkasan Hasil Penelitian Penggunaan RHA dalam Beton

No.	Peneliti & Tahun	Persentase RHA (%)	Umur Beton (hari)	Kuat Tekan (MPa)	Pengaruh terhadap Durabilitas	Catatan Tambahan
1	Li et al. (2023)	5–20%	28 hari	28–44 MPa	Baik pada 15% RHA	R ² model prediksi = 0.97
2	Iqtidar et al. (2021)	0–25%	28 hari	Optimal di 10–15%	Durabilitas tidak dibahas	Studi fokus pada prediksi kuat tekan
3	Nnadi et al. (2023)	0–40%	7 & 28 hari	Penurunan >20% RHA	Tahan terhadap karbonasi	Kuat tekan turun pada >20% RHA
4	Gastaldini et al. (2024)	5–15%	28 hari	Meningkat 15% pada 10% RHA	Tahan erosi & sulfat	Analisis SEM & uji durabilitas lengkap
5	Li & Song (2023)	5–20%	28 hari	30–48 MPa (prediksi)	Tidak dibahas	Model sangat akurat untuk prediksi

6	Huang et al. (2023)	5–25%	28 hari	32–45 MPa	Tidak dibahas	Fokus pada akurasi model prediksi
7	Haruna et al. (2021)	10–30%	28 hari	Optimal 15–20%	Tahan karbonasi & klorida	EANN lebih unggul dari FFNN
8	Nisar & Bhat (2021)	10–20%	7 & 28 hari	Naik 10–15%	Meningkat terhadap korosi	RHA + <i>inhibitor</i> menghasilkan beton tahan korosi
9	Ma et al. (2023)	5–15%	7 & 28 hari	Naik hingga 20%	Peningkatan struktur mikro	RHA halus berpengaruh signifikan
10	Salas Montoya et al. (2023)	10–20%	28 hari	>45 MPa (reaktif tinggi)	Sangat tahan terhadap sulfat & klorida	Kombinasi dengan <i>silica fume</i>
11	Li et al. (2023)	5–20%	28 hari	28–44 MPa	Baik pada 15% RHA	R ² model prediksi = 0.97

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil studi literatur terhadap berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa:

1. Abu sekam padi (RHA) memiliki kandungan silika amorf tinggi yang memungkinkan terjadinya reaksi pozzolanik ketika digunakan sebagai pengganti parsial semen dalam beton.
2. Penggunaan RHA dalam rentang 10–20% dari massa semen secara umum dapat meningkatkan kuat tekan beton, terutama pada umur 28 hari, dengan nilai kuat tekan yang sebanding atau bahkan lebih tinggi dari beton normal.
3. Selain meningkatkan kekuatan, RHA juga memperbaiki durabilitas beton, khususnya terhadap serangan sulfat, penetrasi ion klorida, dan korosi tulangan.
4. Efektivitas RHA sangat dipengaruhi oleh kehalusan partikel dan proses pembakaran, di mana suhu pembakaran ideal berada pada 500–700°C untuk menghasilkan silika amorf aktif.
5. RHA memiliki potensi besar sebagai bahan *pozzolan* lokal yang berkelanjutan, terutama karena tersedia secara melimpah di daerah pertanian di Indonesia, serta dapat mengurangi ketergantungan terhadap semen Portland dan menurunkan jejak karbon dalam konstruksi

Adapun saran yang diberikan penulis adalah sebagai berikut :

1. **Penelitian lanjutan** secara eksperimental sangat disarankan untuk menguji pengaruh variasi kadar RHA terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur beton lokal di Indonesia.
2. Pemerintah dan industri konstruksi diharapkan dapat **mendorong pemanfaatan limbah pertanian** seperti abu sekam padi sebagai bahan tambahan beton dalam rangka mendukung pembangunan berkelanjutan.
3. Perlu dikembangkan **pedoman teknis dan standar lokal** terkait penggunaan RHA dalam beton agar penerapannya dapat lebih luas dan aman secara struktural.
4. Institusi pendidikan tinggi dapat menjadikan topik ini sebagai **model penelitian hemat biaya**, mengingat banyaknya data sekunder yang tersedia dan manfaat lingkungan yang nyata..

Daftar Rujukan

- [1] M. Amin, "A comprehensive review on chemical, mineralogical, and morphological characteristics of supplementary cementitious materials (SCMs)," *Construction and Building Materials*, vol. 285, p. 122936, 2021.
- [2] H. Aziz, P. Suprobo, and D. Hartono, "The role of rice husk ash in enhancing durability of concrete exposed to aggressive environment," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1243, no. 1, p. 012015, 2022.
- [3] A. M. Fadhil, N. H. Ali, and I. S. Kareem, "Effects of rice husk ash on mechanical properties of concrete: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 2601–2606, 2021.
- [4] S. Irawan, A. Yani, and G. Pratama, "Effect of combustion temperature on rice husk ash reactivity as pozzolanic material," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 27, no. 1, pp. 35–42, 2020.
- [5] S. Li, Z. Xu, and J. Wu, "Utilization of rice husk ash as sustainable supplementary cementitious material: Strength and durability properties," *Journal of Cleaner Production*, vol. 407, p. 137198, 2023.
- [6] R. Napitupulu and V. Simanjuntak, "Kajian pemanfaatan abu sekam padi sebagai substitusi semen pada beton mutu sedang," *Jurnal Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara*, vol. 12, no. 2, pp. 79–86, 2023.
- [7] S. Nisar and A. H. Bhat, "Rice husk ash as a potential pozzolanic material in sustainable concrete—A review," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 24, p. 101865, 2021.
- [8] V. Patel and R. Shah, "An overview of concrete composition and properties," *Materials Today: Proceedings*, vol. 32, no. 1, pp. 546–551, 2020.
- [9] M. A. Rahman, M. S. Islam, and M. M. Hossain, "Effect of curing conditions on the strength development of concrete incorporating RHA," *Procedia Engineering*, vol. 171, pp. 760–767, 2018.
- [10] D. Setiawan, A. Pramudita, and Y. Wijaya, "Optimal combustion temperature for maximizing pozzolanic reactivity of rice husk ash," *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, vol. 6, no. 2, pp. 101–108, 2022.
- [11] J. J. Thomas and H. M. Jennings, "Supplementary cementing materials in concrete: Characterization and performance," *Cement and Concrete Research*, vol. 124, p. 105810, 2019.
- [12] Sari, N. L., Mustakim, & Kasmaida. "Characteristics of concrete with the addition of fabric waste as fibers on the compressive and flexural strength of concrete". *Journal of Civil Engineering and Planning (JCEP)*, vol. 5 no.2, pp. 50–58. 2024.
- [13] Jaya, D. P. Pengaruh penambahan limbah kain pakaian bekas terhadap kekuatan tekan dan bending dari komposit foam beton ringan. 2022
- [14] Hariati., Astutik, Y.S. "Studi Komparatif Kerusakan Beton pada Struktur Kolom yang Keropos dengan Metode Grouting". *Journal of Civil Engineering and Planning (JCEP)*, vol. 1 no.2, pp. 99–110. 2020.
- [15] C. Li, X. Mei, D. Dias, Z. Cui, dan J. Zhou, "Compressive strength prediction of rice husk ash concrete using a hybrid artificial neural network model," *Materials*, vol. 16, no. 8, pp. 3135, 2023.
- [16] A. Iqtidar, N. B. Khan, S. Kashif-ur-Rehman, M. F. Javed, F. Aslam, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, dan A. Mosavi, "Prediction of Compressive Strength of Rice Husk Ash Concrete through Different Machine Learning Processes," *Crystals*, vol. 11, no. 4, pp. 352, 2021.
- [17] A. L. G. Gastaldini, M. F. Javed, M. N. Sheikh, F. Aslam, dan R. Alyousef, "Erosion degradation analysis of rice husk ash-rubber-fiber concrete," *Scientific Reports*, vol. 14, pp. 71939, 2024.
- [18] Q. Li dan Z. Song, "Prediction of compressive strength of rice husk ash concrete based on stacking ensemble learning model," *J. Clean. Prod.*, vol. 382, pp. 135279, 2023.
- [19] Y. Huang, Y. Lei, X. Luo, dan C. Fu, "Prediction of compressive strength of rice husk ash concrete: A comparison of different metaheuristic algorithms for optimizing support vector regression," *Case*

- Stud. Constr. Mater., vol. 18, pp. e02201, 2023.
- [20] S. I. Haruna, M. F. Javed, F. Aslam, R. Alyousef, dan M. S. Jamil, "Compressive strength of self-compacting concrete modified with rice husk ash and calcium carbide waste modeling: A feasibility of emerging emotional intelligent model (EANN) versus traditional FFNN," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 46, no. 11, pp. 11207–11222, 2021.
- [21] N. Nisar dan J. A. Bhat, "Experimental investigation of Rice Husk Ash on compressive strength, carbonation and corrosion resistance of reinforced concrete," *Aust. J. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 155–163, 2021.
- [22] W. Ma, Y. Wang, L. Huang, L. Yan, dan B. Kasal, "Natural and recycled aggregate concrete containing rice husk ash as replacement of cement: Mechanical properties, microstructure, strength model and statistical analysis," *J. Build. Eng.*, pp. 105917, 2023.
- [23] A. S. Montoya, C. W. Chung, dan J. H. Kim, "High performance concretes with highly reactive rice husk ash and silica fume," *Materials*, vol. 16, no. 11, pp. 3903, 2023.
- [24] Y. Zhang, L. Wang, dan H. Li, "The Influence of Rice Husk Ash Incorporation on the Properties of Cement-Based Materials," *Materials*, vol. 18, no. 2, pp. 460, 2023.
- [25] M. M. Alsaed dan R. L. Al Mufti, "The Effects of Rice Husk Ash as Bio-Cementitious Material in Concrete," *Constr. Mater.*, vol. 4, no. 3, pp. 629–639, 2024.
- [26] J. M. Marangu, M. Sharma, L. Scheinherrová, I. Kafodya, V. K. Mutai, E. Latif, V. I. Novelli, D. K. Ashish, dan R. Maddalena, "Durability of Ternary Blended Concrete Incorporating Rice Husk Ash and Calcined Clay," *Buildings*, vol. 14, no. 5, pp. 1201, 2024.
- [27] N. M. S. Hasan, M. H. R. Sobuz, M. M. H. Khan, N. J. Mim, M. M. Meraz, S. D. Datta, M. J. Rana, A. Saha, A. S. M. Akid, M. T. Mehedi, M. Houda, dan N. M. Sutan, "Integration of Rice Husk Ash as Supplementary Cementitious Material in the Production of Sustainable High-Strength Concrete," *Materials*, vol. 15, no. 22, pp. 8171, 2022.
- [28] M. Amran, R. Fediuk, G. Murali, N. Vatin, M. Karelina, T. Ozbakkaloglu, R. S. Krishna, A. K. Sahoo, S. K. Das, dan J. Mishra, "Rice Husk Ash-Based Concrete Composites: A Critical Review of Their Properties and Applications," *Crystals*, vol. 11, no. 2, pp. 168, 2021.