Jurnal Impresi Indonesia (JII)
p-ISSN: 2828-1284 e-ISSN: 2810-062x
Vol. 5. No. 8. Agustus 2026

Pemanfaatan Abu Sekam Padi Sebagai Substitusi Parsial Terhadap Kuat Tekan Beton Normal

Putri Nuralia Dikara*, Arief Firmanto
Universitas Swadaya Gunung Jati, Indonesia
Email: putriauliadikara@gmail.com*, arieffirmanto03@gmail.com

Keywords:
Rice husk as; fine aggregate; compressive strength of concrete; magnesium sulfate; partial substitution.

Abstract
The need for sand as a fine aggregate continues to increase in line with infrastructure development, while its availability is increasingly limited due to mining exploitation, so alternative materials such as rice husk ash are needed which are rich in amorphous silica and have the potential to be a filler as well as pozolan in concrete. This study aims to analyze the effect of partial substitution of fine aggregate with commercial rice husk ash from advanced combustion at 300°C on the compressive strength of K-225 quality concrete, determine the optimal substitution percentage, and compare the compressive strength under normal treatment conditions (water immersion) and 5% magnesium sulfate ($MgSO_4$) solution immersion at 28 days of age. The study used a quantitative experimental method with a simple factorial design, including 0%, 5%, and 10% rice husk ash substitution variations against fine aggregate weight and two treatment conditions, resulting in 18 cylindrical test objects that were tested for compressive strength according to SNI 1974:2011. The results showed that 5% substitution produced the highest compressive strength, namely 28.59 MPa under normal conditions and 26.33 MPa under sulfate soaking conditions, an increase of around 24.69% and 22.37% compared to control concrete, respectively, while 10% substitution actually reduced the compressive strength to below the control value due to the dilution effect and increased demand for mixed water. Soaking magnesium sulfate led to a decrease in compressive strength across the variety, with the percentage decrease increasing as the substitution rate increased. It was concluded that the substitution of 5% rice husk ash is an optimal level that is able to significantly increase the compressive strength of K-225 concrete while maintaining the best performance in aggressive sulfate environments.

Kata Kunci:
Abu sekam padi; agregat halus; kuat tekan beton; magnesium sulfat; substitusi parsial.

Abstrak
Kebutuhan pasir sebagai agregat halus terus meningkat sejalan dengan pembangunan infrastruktur, sementara ketersediaannya semakin terbatas akibat eksploitasi penambangan, sehingga diperlukan material alternatif seperti abu sekam padi yang kaya silika amorf dan berpotensi sebagai bahan pengisi sekaligus pozolan dalam beton. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh substitusi parsial agregat halus dengan abu sekam padi komersial hasil pembakaran lanjutan pada suhu 300°C terhadap kuat tekan beton mutu K-225, menentukan persentase substitusi optimum, serta membandingkan kuat tekan pada kondisi perawatan normal (rendaman air) dan rendaman larutan magnesium sulfat ($MgSO_4$) 5% pada umur 28 hari. Penelitian menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan desain faktorial sederhana, meliputi variasi substitusi abu sekam padi 0%, 5%, dan 10% terhadap berat agregat halus serta dua kondisi perawatan, menghasilkan 18 benda uji silinder yang diuji kuat tekannya sesuai SNI 1974:2011. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi 5% menghasilkan kuat tekan tertinggi, yaitu 28,59 MPa pada kondisi normal dan 26,33 MPa pada

kondisi rendaman sulfat, meningkat masing-masing sekitar 24,69% dan 22,37% dibandingkan beton kontrol, sedangkan substitusi 10% justru menurunkan kuat tekan hingga di bawah nilai kontrol akibat efek pengenceran dan meningkatnya kebutuhan air campuran. Perendaman magnesium sulfat menyebabkan penurunan kuat tekan pada seluruh variasi, dengan persentase penurunan yang membesar seiring bertambahnya kadar substitusi. Disimpulkan bahwa substitusi 5% abu sekam padi merupakan kadar optimum yang mampu meningkatkan kuat tekan beton K-225 secara signifikan sekaligus mempertahankan kinerja terbaik pada lingkungan sulfat yang agresif.

PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi paling dominan digunakan secara global karena keunggulannya dalam hal kuat tekan, kemudahan pengerjaan, dan ketersediaan bahan baku (Tuanakotta & Amahoru, 2025). Seiring pesatnya pembangunan infrastruktur di berbagai belahan dunia, termasuk Indonesia, kebutuhan akan agregat, khususnya agregat halus berupa pasir, terus meningkat tajam setiap tahunnya. Di sisi lain, sektor pertanian di berbagai negara penghasil padi, termasuk Indonesia, menghasilkan limbah sekam padi dalam jumlah masif yang berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak dimanfaatkan secara optimal. Kedua isu global ini, yaitu terbatasnya ketersediaan pasir alam dan melimpahnya limbah pertanian, saling berkaitan dan mendorong upaya pemanfaatan limbah sekam padi sebagai material alternatif substitusi agregat halus dalam campuran beton.

Beberapa faktor mendasari timbulnya permasalahan tersebut. Pertama, menggeliatnya pembangunan infrastruktur di kawasan perkotaan maupun pedesaan meningkatkan permintaan pasir sebagai agregat halus, sementara eksploitasi penambangan pasir yang intensif dan terus-menerus menyebabkan ketersediaan pasir alam di berbagai daerah penghasil semakin terbatas. Kedua, proses penggilingan gabah menjadi beras yang dilakukan secara masif di Indonesia, sebagai salah satu negara penghasil padi terbesar dunia dengan produksi gabah kering sekitar 54–55 juta ton per tahun berdasarkan data Badan Pusat Statistik, menghasilkan sekam padi dengan proporsi sekitar 20–25 persen dari bobot gabah kering, sehingga potensi limbah sekam padi nasional mencapai 10–14 juta ton setiap tahunnya. Ketiga, sebagian besar sekam padi tersebut hanya dibakar begitu saja di lahan terbuka tanpa pemanfaatan lebih lanjut, akibat keterbatasan teknologi pengolahan dan minimnya insentif ekonomis bagi pelaku usaha penggilingan padi untuk mengolahnya menjadi produk bernilai tambah.

Faktor-faktor tersebut menimbulkan dampak ganda yang saling memperburuk. Kelangkaan pasir alam akibat penambangan berlebihan berdampak pada kerusakan ekologis di kawasan sungai maupun pesisir, mulai dari abrasi, penurunan muka tanah, hingga rusaknya habitat perairan. Sementara itu, pembakaran sekam padi secara terbuka tanpa pengendalian menjadi sumber pencemaran udara dan menyumbang emisi yang tidak terkelola bagi lingkungan sekitar. Apabila kedua permasalahan ini dibiarkan, sektor konstruksi akan semakin bergantung pada sumber daya alam yang kian menipis, sementara limbah pertanian tetap menjadi beban lingkungan yang tidak terselesaikan. Kondisi inilah yang mendorong para akademisi maupun praktisi konstruksi untuk mengupayakan material alternatif yang dapat menggantikan sebagian fungsi pasir tanpa mengorbankan kinerja struktural beton yang disyaratkan.

Abu sekam padi (Rice Husk Ash/RHA) merupakan salah satu kandidat material alternatif yang menjanjikan, karena mengandung silika (SiO_2) dalam proporsi sangat tinggi, yakni berkisar 85 hingga 95 persen dari total komposisi kimianya (Naji et al., 2010). Kandungan silika amorf yang tinggi ini menjadikan abu sekam padi berpotensi besar difungsikan sebagai bahan pengisi (filler) sekaligus bahan pozolan dalam campuran beton, karena partikelnya yang halus mampu mengisi rongga mikro di antara butiran pasir sekaligus berpartisipasi dalam reaksi pozolanic tambahan bersama kalsium hidroksida hasil hidrasi

semen (Siddika et al., 2018). Berbeda dari sejumlah penelitian terdahulu yang umumnya memproses sekam padi mentah secara langsung menjadi abu, penelitian ini menggunakan abu sekam padi komersial yang diperoleh dari pemasok dalam bentuk serbuk siap pakai, kemudian dilakukan pembakaran lanjutan (secondary calcination) pada suhu 300°C untuk menghilangkan kadar air sisa, memastikan oksidasi tuntas bahan organik, serta menstandarkan reaktivitas pozolanic pada seluruh variasi penelitian. Sebagai variabel bebas, abu sekam padi disubstitusikan secara parsial terhadap agregat halus, bukan semen, dengan variasi 0, 5, dan 10 persen terhadap berat agregat halus, sedangkan variabel terikatnya adalah kuat tekan beton mutu K-225 pada umur 28 hari, yang turut dibandingkan antara kondisi perawatan normal berupa rendaman air dan kondisi rendaman larutan magnesium sulfat ($MgSO_4$) lima persen sebagai simulasi lingkungan agresif (Chatveera & Lertwattanaruk, 2009).

Kebaruan penelitian ini terletak pada beberapa aspek metodologis yang membedakannya dari penelitian-penelitian terdahulu. Sebagian besar penelitian sejenis, misalnya (Hendramawat Aski Safarizki et al., 2021), (Farhan et al., 2023), dan (Prastiyo et al., 2024), memanfaatkan abu sekam padi sebagai substitusi sebagian semen dan hanya meninjau kuat tekan pada kondisi perawatan normal. Penelitian ini secara khusus memposisikan abu sekam padi sebagai substitusi parsial agregat halus, bukan semen, sehingga mekanisme kerjanya lebih dominan bersifat fisik melalui pengisian rongga mikro yang dipadukan dengan efek pozolanic sekunder (Wijaya & Blikon, 2020). Selain itu, penggunaan abu sekam padi komersial yang melalui tahap pembakaran lanjutan pada suhu terkontrol 300°C merupakan pendekatan yang belum banyak diadopsi, mengingat mayoritas penelitian terdahulu membakar sekam padi mentah secara langsung dengan riwayat suhu yang telah diketahui sejak awal. Kebaruan lain terletak pada penggabungan pengujian kuat tekan pada dua kondisi perawatan berbeda, yaitu rendaman air normal dan rendaman $MgSO_4$ lima persen, dalam satu rancangan faktorial, sehingga memungkinkan evaluasi komparatif langsung antara peningkatan kuat tekan akibat substitusi abu sekam padi dengan ketahanannya terhadap serangan sulfat, sebagaimana pernah dikaji pada mortar oleh (Chatveera & Lertwattanaruk, 2009) namun belum banyak diterapkan pada beton dengan abu sekam padi sebagai substitusi agregat halus.

Urgensi penelitian ini didasarkan pada kebutuhan mendesak akan solusi material konstruksi yang berkelanjutan di tengah menipisnya sumber daya pasir alam dan menumpuknya limbah pertanian di Indonesia. Minimnya data empiris mengenai perilaku beton dengan substitusi abu sekam padi pada lingkungan sulfat, yaitu suatu kondisi yang lazim dijumpai pada konstruksi di kawasan pesisir atau daerah berkadar garam tinggi, menjadikan penelitian ini relevan secara praktis, khususnya bagi perencanaan infrastruktur di wilayah dengan risiko paparan sulfat tinggi (Bheel et al., 2022). Tanpa kajian yang memadukan aspek pemanfaatan limbah, efisiensi biaya, dan ketahanan terhadap lingkungan agresif secara bersamaan, potensi abu sekam padi sebagai material substitusi agregat halus yang aplikatif di lapangan akan sulit direkomendasikan secara meyakinkan kepada praktisi konstruksi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi parsial agregat halus dengan abu sekam padi komersial hasil pembakaran lanjutan pada suhu 300°C terhadap kuat tekan beton mutu K-225 pada umur 28 hari, menentukan persentase substitusi abu sekam padi yang paling optimum di antara variasi 0, 5, dan 10 persen yang menghasilkan kuat tekan beton tertinggi, serta membandingkan secara kuantitatif nilai kuat tekan beton antara kondisi perawatan normal dan kondisi rendaman larutan magnesium sulfat ($MgSO_4$) lima persen pada setiap variasi substitusi yang diteliti.

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara keilmuan maupun praktis. Secara keilmuan, penelitian ini memperkaya wawasan bidang teknik sipil mengenai pemanfaatan abu sekam padi sebagai bahan substitusi parsial agregat halus serta menjadi referensi bagi penelitian lanjutan terkait material alternatif dalam campuran beton (Nugroho, 2019). Secara praktis, penelitian ini menawarkan alternatif pemanfaatan limbah pertanian

sehingga mampu mengurangi dampak pencemaran lingkungan sekaligus menekan kebutuhan agregat halus alami, memberikan informasi mengenai persentase optimum penggunaan abu sekam padi dalam campuran beton, serta memberikan gambaran perbandingan kuat tekan beton pada kondisi normal dan lingkungan sulfat sebagai pertimbangan penting dalam perencanaan konstruksi di wilayah dengan risiko paparan sulfat tinggi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif, yang dirancang untuk mengungkap hubungan sebab-akibat secara terkontrol antara variasi substitusi abu sekam padi dan kondisi perawatan beton terhadap nilai kuat tekan yang dihasilkan. Pendekatan eksperimental dipilih karena memungkinkan peneliti mengisolasi variabel perlakuan dari faktor pengganggu lainnya, sehingga perbedaan hasil kuat tekan dapat diyakini murni disebabkan oleh perbedaan persentase substitusi dan kondisi lingkungan perawatan, bukan oleh ketidakkonsistenan kualitas bahan baku (Naji et al., 2010). Sifat komparatif penelitian ini tercermin dari perbandingan langsung antara beton yang dirawat pada kondisi normal berupa rendaman air bersih dan beton yang direndam dalam larutan magnesium sulfat lima persen, sehingga efektivitas abu sekam padi dapat dinilai baik dari sisi peningkatan kekuatan maupun ketahanannya terhadap lingkungan agresif (Chatveera & Lertwattanaruk, 2009). Strategi ini dipilih agar hasil penelitian tidak hanya menjawab seberapa besar peningkatan kekuatan yang dapat dicapai, tetapi juga sejauh mana material alternatif tersebut tetap andal ketika dihadapkan pada kondisi lapangan yang lebih menantang.

Seluruh rangkaian pengujian dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Beton, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Swadaya Gunung Jati, Cirebon, tepatnya di gedung tambahan fakultas teknik yang berlokasi di Jalan Perjuangan. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada ketersediaan peralatan uji terstandar dan kemudahan pengawasan langsung terhadap seluruh tahapan perlakuan, mulai dari persiapan bahan hingga pengujian kuat tekan pada umur 28 hari. Penelitian dilaksanakan secara bertahap selama enam bulan, dimulai dari studi literatur dan persiapan bahan pada bulan pertama hingga penyusunan laporan akhir pada bulan keenam, dengan penentuan jadwal yang memperhitungkan waktu perawatan benda uji selama 28 hari penuh sebagai tahapan paling menentukan sebelum pengujian dapat dilakukan (Siddika et al., 2018).

Strategi penelitian ini dibangun di atas dua variabel bebas yang saling berinteraksi, yaitu persentase substitusi abu sekam padi terhadap berat agregat halus dengan tiga taraf, yakni 0 persen, 5 persen, dan 10 persen, serta kondisi perawatan beton dengan dua taraf, yaitu rendaman air normal dan rendaman magnesium sulfat lima persen, dengan variabel terikat berupa nilai kuat tekan beton mutu K-225 pada umur 28 hari. Kombinasi kedua faktor ini menghasilkan enam kelompok perlakuan yang dirancang secara faktorial sederhana, sehingga pengaruh masing-masing faktor maupun interaksi antar faktor dapat diamati secara sistematis. Aspek reaktivitas pozolanic abu sekam padi dikendalikan melalui perlakuan pembakaran lanjutan pada suhu 300°C, sehingga variasi hasil kuat tekan antar kelompok perlakuan dapat lebih diyakini sebagai representasi murni dari pengaruh persentase substitusi, bukan akibat perbedaan kualitas bahan baku (Naji et al., 2010). Sejumlah aspek lain turut dikendalikan secara konsisten pada seluruh variasi, meliputi jenis semen, faktor air-semen, sumber agregat, prosedur pemadatan, hingga laju pembebanan pengujian, agar pengaruh variabel perlakuan dapat teramati secara murni dan terukur.

Populasi penelitian mencakup seluruh kemungkinan benda uji silinder beton mutu K-225 yang dapat dihasilkan dari kombinasi variasi substitusi abu sekam padi dan kondisi perawatan yang ditetapkan. Sampel penelitian ditentukan menggunakan teknik purposive sampling berdasarkan matriks perlakuan faktorial, menghasilkan enam kelompok kombinasi perlakuan yang masing-masing diwakili oleh tiga benda uji silinder berukuran 150 × 300 mm,

sehingga total sampel yang diuji berjumlah 18 benda uji. Jumlah replikasi sebanyak tiga benda uji per kelompok dipilih untuk memungkinkan perhitungan standar deviasi dan koefisien variasi sebagai indikator keandalan data, mengikuti kaidah pengujian kuat tekan beton yang mensyaratkan replikasi guna menjamin representativitas hasil (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2011). Pemilihan jumlah sampel ini juga mempertimbangkan keterbatasan kapasitas cetakan dan efisiensi waktu perawatan, tanpa mengorbankan kecukupan data untuk analisis statistik deskriptif maupun komparatif.

Strategi pengumpulan data pada penelitian ini bertumpu pada penggunaan instrumen laboratorium yang telah terkalibrasi, meliputi timbangan digital, set saringan standar, mesin penggetar ayakan, piknometer, kerucut Abrams, cetakan silinder, serta mesin uji tekan berkapasitas tinggi yang dilengkapi sertifikat kalibrasi dari lembaga terakreditasi. Bahan utama penelitian terdiri atas abu sekam padi komersial yang telah melalui pembakaran lanjutan, semen Portland Tipe I, agregat halus dan kasar dari sumber lokal, air bersih, serta magnesium sulfat heptahidrat sebagai bahan pembentuk larutan rendaman. Pemilihan instrumen dan bahan ini merujuk pada standar teknis yang berlaku, antara lain ketentuan ASTM C618 mengenai persyaratan bahan pozolan dan SNI 03-2834-2000 mengenai perencanaan campuran beton normal, yang merupakan adaptasi dari metode ACI 211.1 dengan penyesuaian terhadap kondisi material dan praktik konstruksi lokal di Indonesia (Nugroho, 2019). Keterpaduan antara instrumen uji dan standar acuan ini menjadi dasar agar data yang dihasilkan dapat direplikasi oleh peneliti lain pada kondisi material yang sebanding.

Strategi pelaksanaan penelitian disusun secara bertahap untuk memastikan setiap sumber variasi selain variabel perlakuan dapat dikendalikan. Tahap awal berupa persiapan dan standardisasi abu sekam padi komersial melalui pembakaran lanjutan, penyaringan, dan penyimpanan kedap udara, bertujuan menjamin keseragaman reaktivitas pozolanic pada seluruh variasi substitusi (Siddika et al., 2018). Tahap berikutnya meliputi perencanaan campuran mengacu pada SNI 03-2834-2000, pembuatan benda uji, serta perawatan pada dua kondisi berbeda selama 28 hari, sebelum akhirnya dilakukan pengujian kuat tekan menggunakan mesin uji tekan sesuai prosedur SNI 1974:2011 (Badan Standar Nasional Indonesia, 1974). Strategi bertahap ini dirancang agar hasil akhir penelitian benar-benar mencerminkan pengaruh variabel perlakuan yang diteliti, sekaligus menjawab permasalahan mengenai persentase substitusi optimum dan ketahanan beton terhadap lingkungan sulfat yang selama ini belum banyak dikaji secara simultan pada substitusi agregat halus (Bheel et al., 2022).

Data kuat tekan yang diperoleh dianalisis menggunakan statistik deskriptif berupa nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi untuk menilai homogenitas data pada setiap kelompok perlakuan, dengan ambang batas koefisien variasi sebesar 10 persen sebagai syarat data yang dapat diterima. Analisis komparatif selanjutnya dilakukan untuk membandingkan kuat tekan antar variasi substitusi pada kondisi perawatan yang sama, kuat tekan kondisi normal terhadap kondisi rendaman magnesium sulfat pada variasi yang sama, serta capaian setiap variasi terhadap target mutu rencana K-225. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel rekapitulasi, diagram batang, dan diagram garis untuk memperlihatkan tren perubahan kuat tekan seiring meningkatnya persentase substitusi abu sekam padi, sebagaimana pendekatan analisis komparatif yang lazim digunakan pada penelitian sejenis (Wijaya & Blikon, 2020; Prastiyo et al., 2024). Melalui rangkaian strategi tersebut, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan simpulan yang terukur mengenai kadar substitusi abu sekam padi yang paling sesuai untuk diterapkan pada konstruksi beton K-225, baik pada lingkungan normal maupun lingkungan dengan risiko paparan sulfat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil dan Cakupan Data Penelitian

Penelitian ini menghimpun data primer dari pengujian laboratorium terhadap 18 benda uji silinder beton berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm, yang terbagi ke dalam enam kelompok perlakuan hasil kombinasi tiga taraf substitusi abu sekam padi (ASP), yaitu 0 persen sebagai kontrol, 5 persen, dan 10 persen terhadap berat agregat halus, dengan dua kondisi perawatan, yaitu rendaman air bersih selama 28 hari dan rendaman larutan magnesium sulfat 5 persen selama 28 hari. Setiap kelompok diwakili oleh tiga benda uji, sehingga data kuat tekan yang dianalisis berjumlah 18 titik data pengukuran, ditambah data pendukung berupa karakteristik fisik abu sekam padi, semen, agregat halus, dan agregat kasar, serta data nilai slump pada setiap batch pencampuran. Cakupan data ini dirancang agar cukup memadai untuk menjawab tiga permasalahan penelitian, yaitu pengaruh substitusi terhadap kuat tekan, kadar substitusi optimum, serta perbandingan ketahanan beton pada kondisi normal dan lingkungan sulfat, sekaligus memenuhi kaidah replikasi tiga benda uji per kelompok yang disyaratkan untuk perhitungan standar deviasi dan koefisien variasi (Naji et al., 2010).

Karakteristik Material sebagai Dasar Keandalan Data

Sebelum data kuat tekan dianalisis lebih lanjut, seluruh material penyusun beton terlebih dahulu dipastikan memenuhi persyaratan mutu. Abu sekam padi hasil pembakaran lanjutan pada suhu 300°C menunjukkan persentase lolos saringan No. 200 sebesar 92,6%, mengindikasikan tingkat kehalusan yang memadai untuk berfungsi sebagai bahan pengisi rongga mikro sekaligus bahan pozolan (Siddika et al., 2018). Agregat halus memiliki modulus kehalusan 2,84 yang berada pada rentang 2,3–3,1 sesuai SNI, dengan kadar lumpur 3,98% yang masih di bawah ambang 5%, sementara berat jenis agregat kasar dan halus juga berada pada kisaran normal. Nilai slump pada seluruh variasi tercatat berada pada rentang 10–14 cm, yang masih memenuhi rentang workability yang dipersyaratkan meskipun terjadi kecenderungan penurunan nilai slump seiring meningkatnya kadar ASP, sejalan dengan temuan (Siddika et al., 2018) bahwa luas permukaan spesifik ASP yang tinggi meningkatkan kebutuhan air efektif campuran. Kondisi material yang memenuhi syarat ini menjadi dasar bahwa perbedaan kuat tekan yang teramati pada tahap selanjutnya benar-benar mencerminkan pengaruh variabel perlakuan, bukan akibat penyimpangan kualitas bahan baku (Nugroho, 2019).

Tabel 1 berikut merangkum hasil statistik kuat tekan beton pada kedua kondisi perawatan untuk seluruh variasi substitusi abu sekam padi, sebagai temuan inti yang menjawab permasalahan pertama dan kedua penelitian.

Tabel 1. Rekapitulasi statistik kuat tekan beton umur 28 hari

Variasi ASP	Kondisi	Rata-rata (MPa)	SD (MPa)	CV (%)
0% (kontrol)	Normal	22,930	2,247	9,799
5%	Normal	28,592	2,247	7,859
10%	Normal	18,778	3,424	18,236
0% (kontrol)	Rendaman $MgSO_4$ 5%	21,515	1,768	8,217
5%	Rendaman $MgSO_4$ 5%	26,327	1,297	4,928
10%	Rendaman $MgSO_4$ 5%	16,324	2,008	12,303

Pengaruh Substitusi Abu Sekam Padi terhadap Kuat Tekan Beton Kondisi Normal

Data pada Tabel 1 menunjukkan pola non-linear yang menjadi temuan utama penelitian ini. Kuat tekan rata-rata pada kondisi normal meningkat dari 22,93 MPa pada beton kontrol menjadi 28,59 MPa pada substitusi 5%, atau setara peningkatan 24,69%, sebelum akhirnya turun tajam menjadi 18,78 MPa pada substitusi 10%, atau setara penurunan 18,11% di bawah kontrol. Gambar 1 di atas memperlihatkan pola tersebut secara visual, sekaligus membandingkannya dengan capaian pada kondisi rendaman $MgSO_4$ dan garis target mutu rencana K-225 setara 18,68 MPa. Peningkatan pada kadar 5% dijelaskan melalui dua

mekanisme yang bekerja bersamaan, yaitu efek pengisian rongga mikro (micro-filler effect) oleh partikel abu sekam padi yang sangat halus, yang mengisi ruang kosong antar butiran pasir sehingga meningkatkan kepadatan matriks beton, serta efek pozolanic sekunder antara silika amorf dengan kalsium hidroksida bebas hasil hidrasi semen yang membentuk tambahan senyawa calcium silicate hydrate pengikat (Siddika et al., 2018). Kedua mekanisme ini juga memperbaiki kualitas zona transisi antarmuka antara pasta semen dan permukaan agregat, sebagaimana dibuktikan (Bheel et al., 2022) melalui peningkatan kuat tarik belah beton yang mengandung abu sekam padi.

Sebaliknya, penurunan tajam pada kadar 10% berkaitan dengan efek pengenceran (dilution effect), yaitu berkurangnya proporsi agregat halus sebagai kerangka penahan beban, serta meningkatnya kebutuhan air akibat luas permukaan spesifik abu sekam padi yang tinggi sementara faktor air-semen tetap dijaga konstan pada nilai 0,56 (Naji et al., 2010). Nilai koefisien variasi pada variasi 10% juga tercatat paling tinggi, yaitu 18,24%, jauh melampaui ambang 10%, yang mengindikasikan sebaran hasil antar benda uji kurang homogen dan campuran lebih sensitif terhadap variasi workability pada kadar substitusi tinggi.

Capaian terhadap Target Mutu Rencana K-225

Sebagai penegasan atas jawaban terhadap permasalahan kedua penelitian, seluruh variasi dibandingkan pula terhadap target mutu rencana K-225 yang dikonversi setara 18,68 MPa mengikuti pendekatan konversi yang juga digunakan oleh (Prastiyo et al., 2024).

Tabel 2. Capaian kuat tekan terhadap target mutu rencana K-225 (≈18,68 MPa)

Variasi ASP	Kuat Tekan Normal (MPa)	% thd Target	Kuat Tekan $MgSO_4$ (MPa)	% thd Target
0% (kontrol)	22,930	122,75%	21,515	115,17%
5%	28,592	153,06%	26,327	140,94%
10%	18,778	100,53%	16,324	87,37%

Tabel 2 memperlihatkan bahwa pada kondisi normal, ketiga variasi mampu mencapai atau melampaui target. Pada kondisi rendaman sulfat, variasi 0 dan 5% masih memenuhi target, sedangkan variasi 10% turun menjadi 87,37% sehingga tidak lagi memenuhi mutu rencana setelah terpapar lingkungan sulfat selama 28 hari. Pola pencapaian ini konsisten dengan rentang kadar optimum 5–10% yang juga dilaporkan oleh (Yawan et al., 2025) dan (Bertarina, 2025) pada penelitian sejenis, meskipun kedua penelitian tersebut tidak turut mengevaluasi kinerja pada lingkungan sulfat sebagaimana dilakukan pada penelitian ini.

Ketahanan Beton terhadap Lingkungan Sulfat

Selain kondisi normal, penelitian ini menghasilkan temuan penting pada kondisi rendaman magnesium sulfat 5% selama 28 hari sebagai simulasi lingkungan agresif.

Tabel 3. Perbandingan kuat tekan normal vs rendaman $MgSO_4$ 5% dan persentase penurunannya (ΔKT)

Variasi ASP	f'c Normal (MPa)	f'c $MgSO_4$ (MPa)	Selisih (MPa)	ΔKT (%)
0% (kontrol)	22,930	21,515	1,415	6,173%
5%	28,592	26,327	2,265	7,921%
10%	18,778	16,324	2,454	13,065%

Tabel 3 di atas memperlihatkan tren persentase penurunan kuat tekan akibat serangan sulfat yang justru meningkat seiring bertambahnya kadar substitusi. Temuan ini pada awalnya tampak berlawanan dengan ekspektasi bahwa abu sekam padi akan menurunkan persentase kehilangan kekuatan akibat sulfat sebagaimana dilaporkan pada mortar oleh (Chatveera & Lertwattanaruk, 2009), yang menjelaskan bahwa ion magnesium dari larutan $MgSO_4$

mendekomposisi senyawa calcium silicate hydrate menjadi magnesium silicate hydrate yang tidak memiliki sifat mengikat, sekaligus bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk gipsum dan ettringit ekspansif. Pada kadar substitusi tinggi, matriks pengikat yang telah melemah akibat efek pengenceran diduga menjadi lebih rentan terhadap degradasi kimiawi tambahan tersebut. Namun demikian, apabila ditinjau dari nilai kuat tekan absolut yang tersisa, beton dengan substitusi 5% tetap menjadi yang paling kuat dan paling andal, yaitu 26,33 MPa atau setara 140,94% dari target mutu rencana, jauh melampaui beton kontrol maupun variasi 10% yang hanya mencapai 87,37% dari target pada kondisi rendaman yang sama. Perbedaan antara ketahanan relatif (persentase kehilangan kekuatan) dan ketahanan absolut (nilai kuat tekan yang tersisa) inilah yang menjadi salah satu poin penting untuk menjawab permasalahan penelitian mengenai perilaku beton ber-ASP di lingkungan agresif (Bheel et al., 2022).

Temuan penelitian ini memperkuat sekaligus memperkaya kebaruan yang telah dikemukakan pada bagian pendahuluan. Berbeda dari (Hendramawat Aski Safarizki et al., 2021), (Farhan et al., 2023), dan (Prastiyo et al., 2024) yang mensubstitusikan abu sekam padi sebagai pengganti sebagian semen dan hanya meninjau kondisi perawatan normal, penelitian ini membuktikan bahwa mekanisme substitusi pada agregat halus tetap mampu menghasilkan peningkatan kuat tekan yang signifikan, bahkan dengan pola optimum yang sejalan dengan temuan (Wijaya & Blikon, 2020) yang juga menemukan variasi 5 dan 10% ASP terhadap agregat halus meningkatkan kuat tekan sebelum menurun pada kadar 15%, serta konsisten dengan (Hasbhi et al., 2023) yang melaporkan kuat tekan tertinggi pada substitusi 10% agregat halus meski pada rentang kadar yang berbeda. Kebaruan metodologis berupa penggunaan abu sekam padi komersial yang distandarkan melalui pembakaran lanjutan pada suhu 300°C juga terbukti menghasilkan material dengan reaktivitas pozolanic yang konsisten, ditunjukkan oleh rendahnya koefisien variasi pada variasi 0 dan 5%, sejalan dengan prinsip kehati-hatian metodologis yang dikemukakan (Naji et al., 2010).

Adapun temuan mengenai pola ΔKT yang meningkat seiring kadar substitusi merupakan kebaruan tersendiri, karena sebagian besar penelitian terdahulu seperti (Chatveera & Lertwattanaruk, 2009) berfokus pada substitusi semen dalam mortar, sementara penelitian ini secara khusus mengisi kekosongan kajian mengenai ketahanan sulfat pada beton dengan ASP sebagai substitusi agregat halus. Dibandingkan dengan (Patah & Dasar, 2022) yang melaporkan kuat tekan optimum 40,65 MPa pada penggantian 10% RHA sebagai bahan cementitious tambahan, capaian kuat tekan pada penelitian ini secara absolut lebih rendah karena perbedaan mendasar pada komponen yang disubstitusi dan mutu beton rencana yang digunakan, namun pola kenaikan-penurunan yang ditemukan tetap konsisten secara kualitatif dengan kajian tersebut maupun dengan (Ciptasari et al., 2017) yang menemukan titik optimum pada kadar substitusi rendah.

Solusi dan Dampak terhadap Permasalahan Penelitian

Hasil penelitian ini secara langsung menjawab urgensi yang dikemukakan pada bagian pendahuluan, yaitu kebutuhan solusi atas kelangkaan pasir alam dan menumpuknya limbah sekam padi. Penyebab utama permasalahan, yaitu eksploitasi penambangan pasir dan pembakaran sekam padi tanpa pemanfaatan, dapat diatasi melalui solusi konkret berupa substitusi 5% abu sekam padi terhadap agregat halus, yang terbukti tidak hanya mengurangi kebutuhan pasir alam tetapi juga meningkatkan kuat tekan beton hingga melampaui target mutu rencana K-225 dengan margin yang besar, baik pada kondisi normal maupun pada kondisi rendaman sulfat. Dampak yang dapat diperoleh apabila solusi ini diterapkan mencakup penghematan biaya konstruksi karena harga abu sekam padi jauh lebih murah dibandingkan semen (Tuanakotta & Amahoru, 2025), pengurangan tekanan terhadap sumber daya pasir alam, serta pemanfaatan limbah pertanian yang selama ini menjadi beban lingkungan menjadi material bernilai tambah, sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan target pembangunan berkelanjutan, khususnya SDG 9 dan SDG 12.

Sebaliknya, apabila solusi ini tidak diterapkan dan substitusi dipaksakan pada kadar 10% tanpa penyesuaian kebutuhan air, dampak negatif berupa penurunan kuat tekan di bawah target mutu rencana justru berpotensi terjadi, terutama pada struktur yang berada di lingkungan dengan risiko paparan sulfat tinggi seperti kawasan pesisir (Bheel et al., 2022). Dengan demikian, rekomendasi kadar substitusi 5% abu sekam padi menjadi solusi paling seimbang antara manfaat lingkungan, efisiensi biaya, dan keandalan struktural yang dipersyaratkan, sekaligus menjadi jawaban konkret atas urgensi penelitian ini dalam mendukung konstruksi beton K-225 yang lebih berkelanjutan tanpa mengorbankan kinerja struktural, baik pada kondisi lingkungan normal maupun kondisi lingkungan sulfat yang agresif. Sebagai catatan penutup, keberhasilan tahap pembakaran lanjutan dalam menstandarkan reaktivitas pozolanic abu sekam padi komersial pada penelitian ini juga sejalan dengan prinsip bahwa suhu perlakuan termal sangat menentukan kualitas produk turunan sekam padi, sebagaimana ditunjukkan (Rusman et al., 2023) pada konteks briket arang aktif, sehingga langkah pembakaran lanjutan pada suhu terkontrol layak diadopsi pada penelitian-penelitian sejenis yang menggunakan abu sekam padi komersial sebagai bahan baku utama.

KESIMPULAN

Penelitian ini disusun untuk mengetahui pengaruh substitusi parsial agregat halus dengan abu sekam padi komersial hasil pembakaran lanjutan pada suhu 300°C terhadap kuat tekan beton mutu K-225, menemukan kadar substitusi paling optimum, serta membandingkan kinerja beton pada kondisi perawatan normal dan rendaman magnesium sulfat 5%. Temuan menunjukkan bahwa hubungan antara kadar substitusi dan kuat tekan bersifat non-linear: kadar 5% menjadi titik optimum yang menaikkan kuat tekan jauh melampaui target rencana pada kedua kondisi perawatan, sementara kadar 10% justru menurunkan kekuatan akibat efek pengenceran dan meningkatnya kebutuhan air campuran. Ketahanan terhadap sulfat menunjukkan pola yang lebih rumit, di mana persentase kehilangan kekuatan relatif justru membesar seiring bertambahnya kadar substitusi, namun secara nilai absolut kadar 5% tetap paling tangguh. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pembuktian bahwa abu sekam padi komersial yang distandarkan melalui pembakaran lanjutan dapat difungsikan secara andal sebagai substitusi agregat halus, sekaligus menyediakan data empiris yang selama ini jarang dikaji mengenai interaksi antara substitusi agregat halus dan ketahanan sulfat dalam satu rancangan penelitian, melengkapi literatur yang umumnya berfokus pada substitusi semen. Penelitian ini juga menegaskan pentingnya membedakan ketahanan relatif dan ketahanan absolut ketika menilai kinerja material substitusi pada lingkungan agresif. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan, antara lain belum dilakukannya karakterisasi kimia dan mineralogi abu sekam padi secara instrumental, rentang variasi substitusi yang belum cukup rapat untuk memastikan titik optimum secara presisi, serta pengujian yang hanya dilakukan pada satu titik umur dan satu konsentrasi larutan sulfat. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian XRF, XRD, atau SEM terhadap abu sekam padi, memperluas variasi substitusi di sekitar kadar 5–10%, serta mengkaji variasi umur pengujian dan konsentrasi larutan sulfat yang lebih beragam untuk memperoleh gambaran ketahanan jangka panjang yang lebih menyeluruh, sehingga rekomendasi kadar substitusi optimum dapat diterapkan secara lebih meyakinkan pada praktik konstruksi beton berkelanjutan di lapangan.

REFERENSI

Badan Standar Nasional Indonesia. (1974). Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder. *Badan Standarisasi Nasional, Jakarta*.

Badan Standardisasi Nasional. (1996). SNI 03-4142-1996 Metode Pengujian Jumlah Bahan Dalam Agregat Yang Lolos Saringan No. 200 (0,075 Mm). *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*, *200*(200), 1–6.

Bertarina. (2025). Analisis pengaruh abu sekam padi (rice husk ash) sebagai bahan tambah terhadap uji kuat tekan beton. Jurnal SENDI, 6(1). https://publikasi.teknokrat.ac.id/index.php/sendi/article/view/414

Bheel, N., Keerio, M. A., Kumar, A., Shahzaib, J., Ali, Z., Ali, M., & Sohu, S. (2022). An investigation on fresh and hardened properties of concrete blended with rice husk ash as cementitious ingredient and coal bottom ash as sand replacement material. Silicon, 14(2), 677–688. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00906-3

Chatveera, B., & Lertwattanaruk, P. (2009). Evaluation of sulfate resistance of cement mortars containing black rice husk ash. Journal of Environmental Management, 90(3), 1435–1441. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.09.001

Ciptasari, D. K., Noor, F. A., & Haryanto, B. (2017). Pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap kuat tekan beton dengan agregat kasar koral Long Iram dan agregat halus pasir Mahakam. Jurnal Teknologi Sipil, 1(2), 50–56.

Farhan, M., Nuklirullah, M., & Bahar, F. F. (2023). Pengaruh penggunaan abu sekam padi sebagai bahan tambahan terhadap kuat tekan beton. Jurnal Teknik, 21(1), 58–67. https://doi.org/10.37031/jt.v21i1.351

Hasbhi, F., Ngurah, I. G., Dharmayasa, P., Ariawan, P., & Agus, K. (2023). Pengaruh komposisi abu sekam padi terhadap kuat tekan beton. Reinforcement: Review in Civil Engineering Studies and Management, 2(1), 25–39.

Hendramawat Aski Safarizki, Marwahyudi, & Pamungkas, W. A. (2021). Beton ramah lingkungan dengan abu sekam padi sebagai pengganti sebagian semen pada era new normal. Jurnal Riset Rekayasa Sipil, 4(2).

Naji, A., Abdul Salleh, M., Nora, F., Aziz, A., & Amran, M. (2010). Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete. Construction and Building Materials, 24(11), 2145–2150. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.045

Nugroho, A. (2019). Pengaruh penggunaan abu sekam padi terhadap sifat mekanik beton busa ringan. Jurnal Teknik Sipil, 24(2), 139–144. https://doi.org/10.5614/jts.2017.24.2.4

Patah, D., & Dasar, A. (2022). Strength performance of concrete using rice husk ash as supplementary cementitious materials (SCM). Journal of Civil Engineering Forum, 8(3), 267–276. https://doi.org/10.22146/jcef.3488

Prastiyo, M., Ramadhani, R., Nugroho, M. W., & Sundari, T. (2024). Analisis pengaruh penambahan abu sekam padi pada beton f'c 18,68 MPa terhadap kuat tekan. STABILITA: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 12(2), 84–93.

Rusman, L. O., Lestari, L., Raharjo, S., Usman, I., & Chrismiwahdani, D. (2023). Pengaruh temperatur aktivasi terhadap kualitas briket arang aktif sekam padi. Journal Online of Physics, 8(3), 39–46. https://doi.org/10.22437/jop.v8i3.23846

Siddika, A., Al Mamun, A., & Hedayet, M. (2018). Study on concrete with rice husk ash. Innovative Infrastructure Solutions, 3(1), 1–9.

SNI 03-2816-1992. (1992). Metode Pengujian Kadar Zat Organik Agregat Halus. Standardisasi Nasional Indonesia Nasional Indonesia, 4, 2–3.

SNI 15-3500. (2004). Semen Portland Campur. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 1–11.

SNI 1970:2008. (2008). Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus. Badan Standar Nasional Indonesia, 7–18. http://sni.litbang.pu.go.id/index.php?r=/sni/new/sni/detail/id/195

SNI 1972-2008. (2008). SNI 1972-2008: Metode Pengujian Slump Beton. Jakarta: Badan Standar Nasional Indonesia, 5.

SNI-03-1968-1990. (1990). SNI-03-1968-1990 Sieve Analysis Agregat Halus dan Agregat Kasar. 1–5.

SNI-2847-2019-Persyaratan-Beton-Struktural-Untuk-Bangunan-Gedung-1. (n.d.).

Tuanakotta, A., & Amahoru, B. (2025). Pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap kuat tekan beton. Jurnal Teknik Sipil dan Teknologi Konstruksi.

Wijaya, H. S., & Blikon, A. O. (2020). Pengaruh variasi abu sekam padi dengan agregat alam Lembata-NTT pada beton mutu f'c 19,3 MPa. Jurnal Teknik Sipil: Rancang Bangun, 6, 6–9.

Yawan, G., Setio Prabowo, Y., & Oka Mahendra, M. (2025). Analisis kuat tekan beton dengan variasi pecahan genteng sebagai agregat kasar dan abu sekam padi sebagai agregat halus. Jurnal Konstruksi, 23(2), 183–189. https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.23-2.2918