



PENGARUH PENGGUNAAN ABU SEKAM PADI SEBAGAI MATERIAL SUBSTITUSI SEBAGIAN SEMEN TERHADAP WORKABILITAS, DENSITAS, DAN KEKUATAN TEKAN BETON

Adji Sutama^{1*}, Verinazul Septriasyah², Teddy Irawan³

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Palembang

*Corresponding Author, Email : adji_sutama@um-palembang.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan material konstruksi untuk pembangunan infrastruktur di Indonesia mengakibatkan konsumsi semen yang tinggi, mencapai 70 juta ton per tahun, yang berdampak pada tingginya emisi CO₂. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh penggunaan abu sekam padi (ASP) sebagai material substitusi sebagian semen terhadap workabilitas, densitas, dan kekuatan tekan beton. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dengan variasi persentase ASP sebagai substitusi semen sebesar 0% (kontrol), 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen, dengan target kuat tekan rencana 30 MPa. Material yang digunakan meliputi Semen Portland Tipe I, abu sekam padi yang dibakar pada suhu 700°C selama 2 jam dan mengandung silika tinggi (91,42%), agregat kasar, agregat halus, air, dan superplasticizer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi semen dengan ASP menyebabkan penurunan workabilitas yang terukur melalui penurunan nilai slump dari 10 cm (ASP0%) menjadi 9 cm (ASP20%). Peningkatan persentase substitusi ASP berbanding lurus dengan peningkatan densitas beton pada semua umur pengujian. Kekuatan tekan beton tertinggi dicapai pada substitusi 20% ASP sebesar 35,27 MPa pada umur 28 hari, meningkat 12,65% dibandingkan beton normal (31,31 MPa). Hasil penelitian menunjukkan bahwa abu sekam padi berpotensi tinggi sebagai material substitusi sebagian semen dalam produksi beton, tidak hanya memberikan manfaat teknis berupa peningkatan performa beton, tetapi juga berkontribusi pada aspek keberlanjutan melalui pemanfaatan limbah pertanian dan pengurangan emisi karbon dari produksi semen.

Kata Kunci : Workabilitas; Densitas; Kekuatan Tekan Beton; Abu Sekam Padi (ASP)

ABSTRACT

The increased demand for construction materials for infrastructure development in Indonesia has resulted in high cement consumption, reaching 70 million tons annually, impacting CO₂ emissions significantly. This research examines the effects of using rice husk ash (RHA) as a partial cement replacement material on concrete workability, density, and compressive strength. The research method employed an experimental approach with RHA percentage variations as cement substitution at 0% (control), 5%, 10%, 15%, and 20% of cement weight, with a target compressive strength of 30 MPa. Materials used include Type I Portland Cement, rice husk ash burned at 700°C for 2 hours containing high silica (91.42%), coarse aggregate, fine aggregate, water, and superplasticizer. Results show that cement substitution with RHA caused decreased workability as measured by slump value reduction from 10 cm (RHA0%) to 9 cm (RHA20%). Increasing the RHA substitution percentage directly correlated with increased concrete density at all testing ages. The highest concrete compressive strength was achieved at 20% RHA substitution, measuring 35.27 MPa at 28 days, a 12.65% increase compared to normal concrete (31.31 MPa). The research results indicate that rice husk ash has high potential as a partial cement replacement material in concrete production, not only providing technical benefits through improved concrete performance but also contributing to sustainability through agricultural waste utilization and carbon emission reduction from cement production.

Keywords : Workability; Density; Concrete Compressive Strength; Rice Husk Ash (RHA)

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur yang masif di Indonesia telah mendorong kemajuan signifikan dalam industri konstruksi. Hal ini berbanding lurus dengan peningkatan kebutuhan material bangunan, terutama beton yang menjadi bahan utama konstruksi. Menurut Widodo *et al.* (2020), konsumsi semen di Indonesia mencapai 70 juta ton per tahun, yang mengakibatkan dampak lingkungan yang cukup serius akibat produksi semen yang menghasilkan emisi CO₂ yang tinggi.

Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pembangunan berkelanjutan, penelitian tentang material alternatif pengganti semen menjadi fokus utama dalam industri konstruksi (Sutama & Oemiati, 2022). Pemanfaatan limbah pertanian sebagai material substitusi semen telah menjadi trend global dalam upaya mengurangi dampak lingkungan. Pramudya dan Sutanto (2019) menyatakan bahwa Indonesia menghasilkan sekitar 75 juta ton limbah sekam padi tiap tahunnya yang belum dimanfaatkan secara optimal.

Abu sekam padi (*rice husk ash*) adalah salah satu material pozzolanik yang menjanjikan sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton. Sebagai produk sampingan pertanian yang melimpah di negara-negara penghasil beras seperti Tiongkok, Indonesia, India, dan Thailand, pemanfaatan abu sekam padi menawarkan solusi ganda seperti mengurangi limbah pertanian dan menurunkan jejak karbon industri konstruksi. Mehta & Monteiro (2021) dalam penelitian mereka mengungkapkan bahwa abu sekam padi yang mengandung silika amorf berkadar tinggi (85-95%) dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida selama proses hidrasi semen, menghasilkan pembentukan kalsium silikat hidrat tambahan, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan kekuatan beton. Temuan ini diperkuat oleh penelitian Rahman *et al.* (2021) yang membuktikan bahwa silika tersebut memiliki sifat pozzolan ketika dicampurkan dengan semen Portland.

Dalam lima tahun terakhir, studi mengenai pemanfaatan abu sekam padi untuk menggantikan sebagian semen telah mengalami kemajuan signifikan, dengan fokus penelitian meliputi rasio substitusi yang optimal, teknik pemrosesan, dan implikasinya terhadap sifat-sifat beton seperti workabilitas, densitas, dan kekuatan tekan. Berbagai penelitian membuktikan bahwa penggantian semen dengan abu sekam padi dalam batas persentase tertentu berpotensi meningkatkan performa beton, sementara substitusi yang berlebihan dapat berdampak negatif pada sifat-sifat tersebut (Thomas *et al.*, 2020).

Workabilitas beton, yang menentukan kemudahan pengerjaan dan pemadatan, dipengaruhi secara signifikan oleh substitusi abu sekam padi. Kajian oleh Zhang *et al.* (2021) menunjukkan bahwa abu sekam padi yang halus cenderung meningkatkan kebutuhan air karena luas permukaannya yang tinggi, sehingga berpotensi mengurangi workabilitas. Namun, penelitian lain oleh Ramezaniapour *et al.* (2022) menemukan bahwa penggunaan superplasticizer dapat mengkompensasi pengurangan workabilitas ini.

Penggunaan abu sekam padi sebagai substitusi semen memengaruhi densitas beton, suatu parameter yang terkait dengan berat dan kepadatan struktur. Nguyen *et al.* (2023) dalam penelitiannya membuktikan bahwa penggantian ini menyebabkan penurunan densitas karena abu sekam padi memiliki berat jenis lebih rendah dibandingkan semen, menciptakan peluang inovasi dalam pengembangan beton struktural yang lebih ringan.

Kekuatan tekan, yang menjadi parameter penentu kapasitas beban struktural pada beton, menunjukkan pola variasi yang menarik saat abu sekam padi digunakan sebagai campuran. Studi komprehensif oleh Kim *et al.* (2020) mengungkapkan bahwa substitusi semen dengan abu sekam padi tidak melebihi 20% dapat meningkatkan kekuatan tekan jangka panjang, sementara substitusi lebih dari 30% cenderung menurunkan kekuatan tekan secara signifikan. Studi yang dilakukan oleh Santoso dan Gunawan (2021) mendemonstrasikan bahwa penggunaan abu sekam padi dalam proporsi yang tepat dapat menghasilkan beton dengan kekuatan tekan yang setara atau bahkan lebih tinggi dibandingkan beton konvensional.

Abu sekam padi sebagai material substitusi semen memiliki implikasi ekonomi yang menguntungkan. Ibrahim dan Sulistyowati (2020) melaporkan bahwa pemanfaatan abu sekam padi dapat menurunkan biaya produksi beton hingga 15-20% dibandingkan dengan penggunaan semen Portland secara keseluruhan. Penggunaan abu sekam padi sebagai material substitusi semen juga sejalan dengan konsep ekonomi sirkular dan pengurangan limbah. Penelitian Nugroho *et al.* (2022) menunjukkan bahwa pemanfaatan abu sekam padi dalam industri konstruksi dapat mengurangi penumpukan limbah pertanian sekaligus menurunkan emisi karbon dari produksi semen.

Meskipun demikian, implementasi abu sekam padi masih terkendala oleh standarisasi dan pengendalian kualitas. Penelitian Prasetyo dan Hidayat (2023) menunjukkan bahwa perbedaan dalam suhu pembakaran dan kondisi pengolahan sekam padi menghasilkan abu dengan karakteristik berbeda yang berdampak pada mutu beton.

Di Indonesia, penelitian tentang pemanfaatan abu sekam padi sebagai material konstruksi telah dilakukan sejak beberapa dekade terakhir. Namun, Handayani dan Putra (2021) menyatakan bahwa masih diperlukan kajian lebih lanjut mengenai pengaruh penggunaan abu sekam padi terhadap berbagai properti beton, terutama dalam aspek workabilitas, densitas, dan kekuatan tekan untuk mengoptimalkan pemanfaatannya dalam industri konstruksi.

Berdasarkan hal tersebut, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memaksimalkan potensi abu sekam padi sebagai bahan substitusi semen dalam campuran beton. Karakterisasi menyeluruh terhadap sifat-sifat beton, baik ketika masih basah maupun setelah mengeras, menjadi sangat penting untuk memahami dampak substitusi abu sekam padi terhadap kinerja beton secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis bagaimana substitusi sebagian semen dengan abu sekam padi memengaruhi workabilitas, densitas, dan kekuatan tekan beton.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk menginvestigasi pengaruh penggunaan abu sekam padi sebagai material substitusi sebagian semen terhadap workabilitas, densitas, dan kekuatan tekan beton. Seluruh pengujian dilaksanakan dengan mengacu pada standar SNI yang berlaku. Variasi persentase abu sekam padi yang digunakan sebagai material substitusi semen adalah 0% (sebagai kontrol), 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen, dengan target kuat tekan rencana 30 MPa pada umur 28 hari.

Dalam penelitian ini, beberapa parameter dikontrol secara ketat untuk menjamin validitas hasil pengujian, meliputi faktor air semen (*w/c ratio*) yang ditetapkan sebesar 0,40 ($c = \text{berat semen} + \text{abu sekam padi}$), ukuran maksimum agregat kasar 25,4 mm, metode pemadatan yang seragam, serta kondisi perawatan beton pada suhu $25 \pm 2^\circ\text{C}$ dengan kelembaban $95 \pm 5\%$. Material yang digunakan terdiri dari Semen Portland Tipe I, abu sekam padi (ASP), agregat kasar (batu pecah), agregat halus (pasir), air, dan superplasticizer sebesar 1% untuk mempertahankan workabilitas campuran.

Tahap persiapan material dimulai dengan pengujian komposisi kimia abu sekam padi melalui pengujian XRF (*X-Ray Fluorescence*) yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 1. Abu sekam padi diperoleh melalui pembakaran sekam padi pada suhu 700°C selama 2 jam, dilanjutkan dengan penggilingan dan pengayakan hingga lolos saringan nomor 200. Berdasarkan hasil pengujian XRF, abu sekam padi yang dianalisis menunjukkan kualitas yang sangat baik sebagai material pozzolanik dengan kandungan silika sangat tinggi (91,42%) dan memenuhi persyaratan SNI 2460:2014 untuk pozzolan kelas N. Kandungan SO_3 dan LOI yang rendah serta total $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yang tinggi mengindikasikan bahwa abu sekam padi ini memiliki potensi yang sangat baik sebagai material substitusi sebagian semen dalam produksi beton ramah lingkungan.

Tabel 1. Hasil Pengujian XRF Abu Sekam Padi

No.	Komposisi Kimia	Hasil (%)	Persyaratan SNI 2460:2014 Kelas N (%)	
1	SiO_2	91,42		
2	Al_2O_3	0,61	Min. ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)	70
3	Fe_2O_3	0,43		
4	P_2O_5	1,07		
5	MgO	0,83		
6	K_2O	2,31		
7	CaO	1,36		
8	SO_3	0,38	Maks.	4
9	Na_2O	0,21		
10	MnO	0,19		
11	TiO_2	0,11		
12	ZnO	0,05		
13	Cl	0,04		
14	CuO	0,02		
15	LOI	3,42	Maks.	10

Agregat yang digunakan juga melalui serangkaian pengujian meliputi kadar air, berat jenis, berat isi, kadar lumpur, kadar organik, analisis saringan, dan khusus untuk agregat kasar dilakukan pengujian keausan yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan hasil pengujian, baik agregat kasar maupun agregat halus memenuhi semua persyaratan spesifikasi yang ditetapkan dan memiliki karakteristik yang baik untuk digunakan dalam produksi beton. Agregat halus menunjukkan tingkat kebersihan yang memadai dengan kandungan lumpur dan material organik yang rendah, serta distribusi ukuran partikel yang seimbang dalam rentang yang diizinkan. Agregat kasar memperlihatkan daya tahan mekanis yang baik berdasarkan nilai uji abrasi yang jauh di bawah batas maksimum, didukung distribusi gradasi partikel yang proporsional sesuai standar yang disyaratkan.

Tabel 2. Hasil Pengujian Agregat Kasar dan Agregat Halus

No.	Pengujian	Satuan	Agregat Kasar	Persyaratan	Agregat Halus	Persyaratan
1	Kadar Air	%	0,827	0-2	2,013	0-10
2	Berat Jenis					
	Kondisi SSD (S_s)	-	2,558		2,370	
	Semu (S_a)	-	2,612	2,30-2,90	2,430	2,30-2,90
	Curah kering (S_d)	-	2,524		2,328	
	Penyerapan air (S_w)	%	1,341	0-8	1,809	0-8
3	Berat Isi					
	Kondisi padat	kg/m ³	1407		1398	
	Kondisi gembur	kg/m ³	1343	1280-1920	1203	-
4	Kadar Lumpur					
	Lolos saringan No. 200	%	0,644	Maks. 1,5	1,117	Maks. 5
5	Kadar Organik					
	Nomor warna	-	-	-	2	Maks. No. 3
6	Analisa Saringan					
	Ukuran maksimum	mm	25,400	37,5-9,5	2,360	-
	Modulus halus butir	-	5,709	-	2,831	2,0-3,1
7	Abrasi					
	Keausan dengan mesin los angeles	%	25,233	Maks. 50	-	-

Perencanaan campuran beton mengacu pada pedoman SNI 7656:2012 tentang cara menentukan campuran yang tepat untuk beton jenis normal, berat, dan massa. Adapun desain campuran beton yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3. Proses pembuatan sampel diawali dengan penimbangan material sesuai *mix design*, pencampuran menggunakan *concrete mixer*, pengujian slump untuk mengukur workabilitas, pencetakan dalam silinder berukuran Ø15 cm × 30 cm, pemadatan dengan *vibrator*, dan dilanjutkan dengan perawatan benda uji.

Tabel 3. Desain Campuran Beton (kg/m³)

Kode Campuran	Material					
	Semen (kg)	Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	Air (kg)	Abu Sekam Padi (kg)	Superplasticizer (kg)
ASP0%	491,58	695,20	919,18	196,63	0,00	0,00
ASP5%	467,00	695,20	919,18	196,63	24,58	4,92
ASP10%	442,42	695,20	919,18	196,63	49,16	4,92
ASP15%	417,84	695,20	919,18	196,63	73,74	4,92
ASP20%	393,26	695,20	919,18	196,63	98,32	4,92

Keterangan: ASP = Abu Sekam Padi

Pengujian workabilitas dilakukan melalui pengujian slump (SNI 1972:2008) pada beton segar. Densitas beton diukur melalui penimbangan berat dan pengukuran dimensi benda uji. Pengujian kuat tekan dilaksanakan pada tiga periode umur beton yaitu 7, 21, dan 28 hari, dengan masing-masing periode menggunakan 3 sampel untuk setiap variasi campuran, sehingga total benda uji yang digunakan adalah 45 sampel.

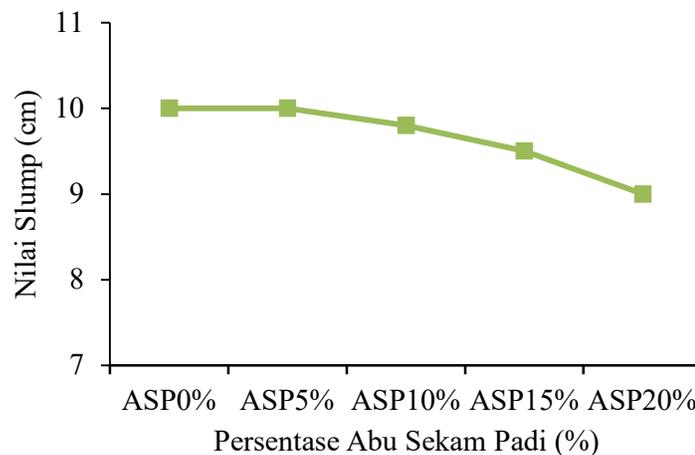
Seluruh prosedur penelitian dilakukan secara sistematis mengikuti diagram alir yang dimulai dari persiapan material, pengujian material, *mix design* beton, pembuatan sampel, perawatan sampel, pengujian sampel, analisis data, hingga penarikan kesimpulan. Metode penelitian ini dirancang untuk memberikan hasil yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah mengenai pengaruh penggunaan abu sekam padi sebagai material substitusi sebagian semen terhadap properti beton yang diteliti.

Analisis data dilakukan secara komprehensif untuk menentukan kadar optimal abu sekam padi yang memberikan kinerja terbaik ditinjau dari aspek workabilitas, densitas, dan kekuatan tekan beton. Hasil analisis akan disajikan dalam bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara variasi persentase abu sekam padi dengan parameter-parameter yang diuji, disertai dengan pembahasan mengenai fenomena yang terjadi dan kaitannya dengan teori yang ada.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Slump (Workabilitas)

Pengujian slump merupakan metode standar untuk mengevaluasi workabilitas beton, yaitu kemudahan pengerjaan dan pemadatan campuran beton sebelum mengeras. Hasil pengujian menunjukkan penurunan nilai slump seiring dengan meningkatnya persentase abu sekam padi, yaitu dari 10 cm pada beton normal (ASP0%) hingga 9 cm pada campuran dengan 20% abu sekam padi (ASP20%) seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil Pengujian Slump

Penurunan workabilitas ini dapat dikaitkan dengan beberapa faktor ilmiah yang kompleks. Pertama, abu sekam padi memiliki karakteristik fisika yang unik, terutama luas permukaan spesifik yang sangat tinggi. Menurut penelitian Ramezaniapour *et al.* (2019), peningkatan luas permukaan spesifik abu sekam padi menyebabkan peningkatan kebutuhan air untuk mencapai kelecakan yang sama. Luas permukaan spesifik abu sekam padi yang tinggi mengakibatkan penyerapan air yang lebih besar, sehingga mengurangi air bebas dalam campuran dan menurunkan workabilitas.

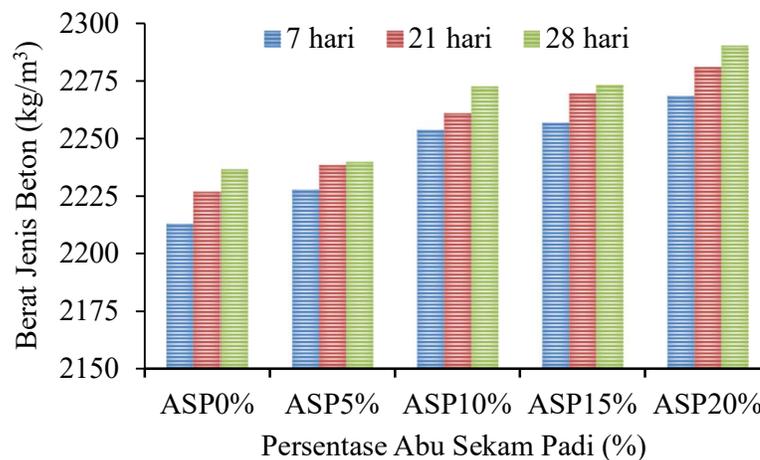
Zhang *et al.* (2020) menjelaskan bahwa morfologi partikel abu sekam padi yang

bersudut dan halus berkontribusi signifikan terhadap penurunan workabilitas. Partikel halus ini mengisi rongga antar agregat, meningkatkan gesekan internal campuran beton, dan mengurangi kemampuan alir material. Penelitian Kumar & Singh (2018) mendukung temuan ini, menunjukkan bahwa peningkatan persentase substitusi semen dengan abu sekam padi di atas 10% secara konsisten menurunkan nilai slump.

Namun, penurunan workabilitas tidak selalu berdampak negatif. Nguyen *et al.* (2021) mengemukakan bahwa penurunan slump dapat mengindikasikan peningkatan kerapatan campuran beton akibat pengisian rongga oleh partikel halus abu sekam padi. Penelitian mereka menunjukkan bahwa campuran dengan penurunan slump 10-15% sering kali memiliki kekuatan tekan beton yang lebih besar dibandingkan campuran dengan workabilitas lebih tinggi.

Hasil Pengujian Berat Jenis Beton (Densitas)

Pengujian berat jenis beton dilakukan pada umur 7, 21, dan 28 hari dengan menggunakan substitusi abu sekam padi terhadap semen sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Hasilnya menunjukkan peningkatan berat jenis beton seiring dengan meningkatnya persentase abu sekam padi dan umur beton seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Pengujian Berat Jenis Beton

Peningkatan berat jenis atau densitas beton dapat dikaitkan dengan karakteristik mikrostruktur abu sekam padi. Menurut penelitian Zhang *et al.* (2019), partikel halus abu sekam padi berperan sebagai bahan pengisi (*filler*) yang efektif, mengisi rongga-rongga antar agregat dan menghasilkan struktur beton yang lebih padat. Proses ini dikenal sebagai efek mikropenambahan (*micro-filling effect*), di mana partikel halus abu sekam padi mengisi celah-celah mikroskopis dalam matriks beton, meningkatkan kerapatan keseluruhan campuran.

Mekanisme reaksi pozzolanik memainkan peran kunci dalam fenomena ini. Kumar & Singh (2018) menjelaskan bahwa silika amorf dalam abu sekam padi bereaksi dengan kalsium hidroksida yang dihasilkan selama proses hidrasi semen, membentuk C-S-H tambahan (kalsium silikat hidrat). Selain menambah kekuatan, reaksi tersebut juga membuat struktur beton lebih padat dengan mengisi rongga-rongga mikroskopis.

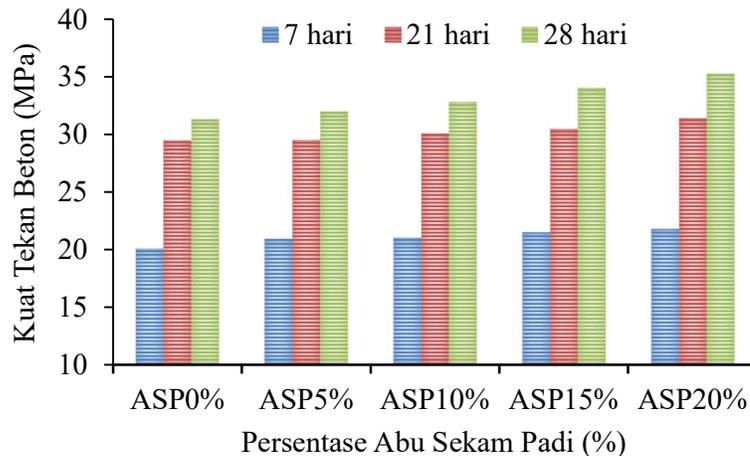
Peningkatan berat jenis yang paling signifikan terlihat pada campuran dengan 10-20% abu sekam padi, konsisten dengan temuan Ramezaniapour *et al.* (2020). Mereka menemukan bahwa substitusi semen dengan abu sekam padi pada rentang 10-15% menunjukkan peningkatan kepadatan paling optimal, di mana efek pengisian pori dan reaksi pozzolanik mencapai titik maksimal sebelum mulai menurun.

Nguyen *et al.* (2021) menambahkan perspektif penting tentang evolusi berat jenis seiring waktu. Peningkatan berat jenis pada berbagai umur pengujian (7, 21, dan 28 hari) menggambarkan proses kontinyu reaksi pozzolanik. Pada tahap awal, peningkatan berat jenis lebih lambat, namun semakin lanjut umur beton, reaksi pozzolanik semakin aktif, menghasilkan peningkatan kepadatan yang lebih konsisten.

Dari sudut pandang mikrostruktur, Thomas *et al.* (2022) menjelaskan bahwa peningkatan berat jenis berkaitan erat dengan pengurangan porositas. Abu sekam padi dengan luas permukaan spesifik tinggi mampu mengisi pori-pori kapiler, mengurangi ruang kosong dalam matriks beton, dan menghasilkan struktur yang lebih padat dan kompak.

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan seiring dengan meningkatnya persentase substitusi abu sekam padi (ASP) dan umur beton seperti yang terlihat pada Gambar 3. Hasil penelitian membuktikan adanya korelasi positif antara penggunaan ASP sebagai bahan substitusi dan peningkatan kekuatan beton. Pada pengujian 28 hari, beton dengan komposisi ASP20% menunjukkan kekuatan tekan tertinggi sebesar 35,27 MPa, melebihi kekuatan beton normal tanpa ASP yang hanya 31,31 MPa, dengan peningkatan sekitar 12,65%.



Gambar 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Peningkatan kuat tekan ini terjadi karena abu sekam padi mengandung SiO_2 (silika amorf) dengan kadar tinggi yang bereaksi dengan Ca(OH)_2 (kalsium hidroksida) dari proses hidrasi semen untuk membentuk C-S-H tambahan (kalsium silikat hidrat) melalui reaksi pozzolanik. Pembentukan C-S-H tambahan ini mengisi pori-pori dalam beton, meningkatkan kerapatan mikrostruktur beton, dan pada akhirnya meningkatkan kekuatan

tekannya (Mehta & Monteiro, 2017). Selain itu, partikel halus abu sekam padi juga berperan sebagai *filler* yang mengisi ruang antar partikel semen, sehingga menghasilkan beton dengan struktur yang lebih padat.

Tren peningkatan kuat tekan seiring meningkatnya kadar ASP juga menunjukkan bahwa hingga kadar 20%, ASP masih memberikan kontribusi positif dan belum mencapai titik optimum. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Givi *et al.* (2010) yang menunjukkan bahwa meskipun abu sekam padi dapat meningkatkan kekuatan beton pada kadar tertentu, jumlah yang terlalu banyak akan mengurangi workabilitas dan kekuatan beton.

Perkembangan kekuatan tekan beton dari umur 7 hingga 28 hari menunjukkan pola yang normal di mana terjadi peningkatan kekuatan yang signifikan antara umur 7 sampai 21 hari, kemudian laju peningkatan melambat pada umur 21 sampai 28 hari. Pola ini konsisten dengan proses hidrasi semen dan reaksi pozzolanik dari abu sekam padi. Reaksi pozzolanik dari ASP membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan hidrasi semen biasa, sehingga kontribusi ASP terhadap kekuatan tekan beton semakin terlihat pada umur beton yang lebih tua (Chindaprasirt *et al.*, 2014).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, terdapat beberapa poin penting yang dapat disimpulkan antara lain:

1. Substitusi semen dengan abu sekam padi menyebabkan penurunan workabilitas yang terukur melalui penurunan nilai slump dari 10 cm pada beton normal (ASP0%) menjadi 9 cm pada beton dengan 20% ASP (ASP20%). Penurunan ini disebabkan oleh karakteristik luas permukaan spesifik ASP yang tinggi, sehingga meningkatkan penyerapan air dan mengurangi air bebas dalam campuran. Meskipun terjadi penurunan workabilitas, beton dengan ASP hingga 20% tetap dapat dikerjakan dengan baik, terutama dengan bantuan superplasticizer.
2. Peningkatan persentase substitusi ASP berbanding lurus dengan peningkatan densitas beton pada semua umur pengujian (7, 21, dan 28 hari). Fenomena ini terjadi karena partikel halus ASP berperan sebagai pengisi yang menutupi rongga-rongga mikro di dalam matriks beton, didukung oleh reaksi pozzolanik yang menghasilkan C-S-H tambahan (kalsium silikat hidrat), sehingga menghasilkan struktur beton yang lebih padat dan kompak.
3. Penggunaan ASP sebagai material substitusi sebagian semen memberikan peningkatan signifikan pada kekuatan tekan beton. Beton dengan substitusi 20% ASP (ASP20%) pada umur 28 hari mencapai kuat tekan tertinggi sebesar 35,27 MPa, meningkat 12,65% dibandingkan beton normal tanpa ASP (31,31 MPa). Peningkatan kekuatan ini terjadi karena kandungan silika amorf tinggi dalam ASP (91,42%) yang bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, membentuk C-S-H tambahan yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan tekan beton.
4. Berdasarkan penelitian secara menyeluruh, abu sekam padi terbukti sangat potensial digunakan sebagai material substitusi sebagian semen untuk produksi beton yang ramah lingkungan. Substitusi hingga 20% ASP masih menunjukkan tren positif pada

densitas dan kekuatan tekan beton, mengindikasikan bahwa titik optimum substitusi belum tercapai. Penggunaan ASP sebagai material substitusi semen tidak hanya memberikan manfaat teknis berupa peningkatan performa beton, tetapi juga berkontribusi pada aspek keberlanjutan melalui pemanfaatan limbah pertanian dan pengurangan emisi karbon dari produksi semen.

DAFTAR PUSTAKA

- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., & Sirivivatnanon, V. (2014). *Effect of Carbon Dioxide on Chloride Penetration and Chloride Ion Diffusion Coefficient of Blended Portland Cement Mortar. Construction and Building Materials*, 57, 139-146.
- Givi, A. N., Rashid, S. A., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M. (2010). *Contribution of Rice Husk Ash to the Properties of Mortar and Concrete: A Review. Journal of American Science*, 6(3), 157-165.
- Handayani, S., & Putra, D. (2021). Review Penelitian Pemanfaatan Abu Sekam Padi di Indonesia. *Jurnal Riset Teknik Sipil*, 11(2), 178-191.
- Ibrahim, M., & Sulistyowati, R. (2020). Analisis Ekonomi Penggunaan Abu Sekam Padi dalam Produksi Beton. *Jurnal Ekonomi Konstruksi*, 9(1), 34-47.
- Kim, H. S., Lee, S. H., & Moon, H. Y. (2020). *Strength Properties and Durability Aspects of High Strength Concrete Using Korean Rice Husk Ash. Construction and Building Materials*, 238, 117697.
- Kumar, R., & Singh, S. (2018). *Influence of Rice Husk Ash on Mechanical Properties of Concrete. Construction and Building Materials*, 187, 432-442.
- Kumar, A., & Singh, B. (2018). *Microstructural Evolution of Rice Husk Ash Blended Cement Paste. Cement and Concrete Composites*, 92, 1-15.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2017). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.)*. McGraw-Hill Education.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2021). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (5th ed.)*. McGraw-Hill Education.
- Nguyen, T. T., Bui, H. H., & Lee, J. H. (2021). *Time-Dependent Density Development in Rice Husk Ash Concrete: A Microstructural Perspective. Materials*, 14(16), 4512.
- Nguyen, T. T., Bui, H. H., Ngo, T. D., & Le, V. H. (2021). *Microstructural Development of Rice Husk Ash Blended Cement Paste. Cement and Concrete Composites*, 115, 103864.
- Nguyen, T. T., Bui, H. H., Ngo, T. D., & Nguyen, G. D. (2023). *Influence of Rice Husk Ash on Engineering Properties of Sustainable Lightweight Concrete. Journal of Building Engineering*, 66, 105767.
- Nugroho, A., Wibowo, H., & Santoso, Y. (2022). Implementasi Ekonomi Sirkular dalam Pemanfaatan Abu Sekam Padi. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 13(4), 223-236.
- Pramudya, K., & Sutanto, H. (2019). Potensi Pemanfaatan Limbah Sekam Padi di Indonesia. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 8(3), 112-125.
- Prasetyo, B., & Hidayat, R. (2023). Pengaruh Variasi Suhu Pembakaran Terhadap Karakteristik Abu Sekam Padi. *Jurnal Material*, 16(1), 90-103.

- Rahman, M. A., Abdullah, N., & Suherman, S. (2021). Karakteristik Kimia dan Fisika Abu Sekam Padi Sebagai Material Pozzolan. *Jurnal Material Konstruksi*, 12(1), 78-89.
- Ramezaniapour, A. A., Ghiasvand, E., Andalibi, M., & Abolmaali, S. A. (2019). *Effect of Rice Husk Ash on Mechanical and Durability Properties of Sustainable Concrete. Journal of Cleaner Production*, 224, 232-244.
- Ramezaniapour, A. A., Khani, A. S., & Ahmadibeni, G. (2020). *Optimization of Rice Husk Ash Replacement in Cement-Based Composites. Construction and Building Materials*, 244, 118314.
- Ramezaniapour, A. A., Madani, H., & Ahmadibeni, G. (2022). *An Investigation on the Effects of Rice Husk Ash on the Properties of Ternary Concrete Mixtures Containing Silica Fume. Journal of Building Engineering*, 51, 104277.
- Santoso, D., & Gunawan, P. (2021). Evaluasi Kekuatan Tekan Beton dengan Substitusi Abu Sekam Padi. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(3), 145-158.
- Sutama, A., & Oemiati, N. (2022). Studi Mikrostruktur Beton Ringan Geopolimer dengan *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *X-Ray Diffraction (XRD)*. *Jurnal Deformasi*, 7(2), 145–160.
- Thomas, B. S., Kumar, S., & Arel, H. S. (2020). *Sustainable Concrete Containing Rice Husk Ash as Supplementary Cementitious Material - A Comprehensive Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110191.
- Thomas, B. S., Kumar, S., & Rao, P. S. (2022). *Microstructural Density and Porosity Characteristics of Sustainable Concrete with Rice Husk Ash. Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00420.
- Widodo, A., Setiawan, B., & Pratama, R. (2020). Analisis Dampak Lingkungan Produksi Semen di Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 15(2), 45-58.
- Zhang, T., Yu, Q., & Wei, J. (2019). *Micro-filling Mechanism of Rice Husk Ash in Cement-Based Materials. Cement and Concrete Research*, 124, 105839.
- Zhang, T., Yu, Q., Wei, J., & Zhang, P. (2020). *Particle Characteristics and Reactivity of Rice Husk Ash. Cement and Concrete Research*, 137, 106196.
- Zhang, T., Yu, Q., Wei, J., & Zhang, P. (2021). *Effects of Size and Surface Characteristics of Rice Husk Ash on Properties of Cement-Based Materials. Construction and Building Materials*, 289, 123165.



Jurnal Deformasi is licensed under
a Creative Commons Attribution-Sharealike 4.0 International License