

OPTIMALISASI KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER MENGGUNAKAN FLY ASH DAN ABU SEKAM PADI

**Muhammad Ramdhan Oliy^{1*}, Novia Mangewa², Rahman
Abdul Djau³, Sartan Nento⁴, Abdul Kadir Zailani Oliy⁵**

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gorontalo
Jl. A.A. Wahab No. 247, Kabupaten Gorontalo 96211
email korespondensi, mr.oliy@unigo.ac.id

SUBMITTED 28 APRIL 2025 REVISED 19 JULI 2025 ACCEPTED 26 JULI 2025

ABSTRACT

Concrete is a widely used construction material, but its environmental impact, particularly the CO₂ emissions, has led to the search for more eco-friendly alternatives. Geopolymer concrete, utilizing fly ash and rice husk ash as binders, presents a promising alternative to conventional concrete. This study aims to investigate the effect of varying the composition of fly ash and rice husk ash on the mechanical properties and workability of geopolymer concrete. The mix variations used consisted of fly ash and rice husk ash ratios of 100:0, 80:20, 70:30, and 50:50, with an alkaline activator solution of 12M NaOH and Na₂SiO₃ in a 1:2.5 ratio. The results showed that the 100% fly ash mix produced the highest compressive strength of 23.13 MPa and a slump value of 8.0 cm, indicating good performance in both strength and workability. On the other hand, increasing the rice husk ash proportion led to a decrease in compressive strength and slump, with the lowest values observed at the 50% rice husk ash mix, which resulted in a compressive strength of 17.20 MPa and a slump of 5.5 cm. Based on these results, it can be concluded that fly ash remains the superior binder for geopolymer concrete, while rice husk ash can be used in controlled proportions to support environmental sustainability. Further research is recommended to explore the use of other additives and conduct microstructure analysis to enhance the performance of geopolymer concrete.

Keywords: Compressive strength, Fly ash, Geopolymer concrete, Rice husk ash, Sustainable construction, Workability,

ABSTRAK

Beton merupakan material konstruksi yang banyak digunakan, namun dampak lingkungan yang ditimbulkan, terutama dalam hal emisi CO₂, mendorong pencarian alternatif yang lebih ramah lingkungan. Beton geopolimer, yang memanfaatkan fly ash dan abu sekam padi sebagai bahan pengikat, dapat menjadi solusi yang menjanjikan untuk menggantikan beton konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi komposisi fly ash dan abu sekam padi terhadap sifat mekanis dan workability beton geopolimer. Variasi campuran yang digunakan terdiri dari proporsi fly ash dan abu sekam padi sebesar 100:0, 80:20, 70:30, dan 50:50, dengan larutan alkali aktivator NaOH 12M dan Na₂SiO₃ dengan rasio 1:2,5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran dengan 100% fly ash menghasilkan kuat tekan tertinggi, yaitu 23,13 MPa, dan nilai slump 8,0 cm, yang mengindikasikan kinerja beton yang baik dalam hal kekuatan dan workability. Sebaliknya, peningkatan proporsi abu sekam padi menyebabkan penurunan kuat tekan dan slump, dengan nilai terendah pada campuran 50% abu sekam padi, yang menghasilkan kuat tekan 17,20 MPa dan nilai slump 5,5 cm. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa *fly ash* tetap menjadi bahan pengikat utama yang lebih baik untuk beton geopolimer, sementara abu sekam padi dapat digunakan dalam proporsi terkendali untuk mendukung keberlanjutan lingkungan. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi penggunaan bahan tambahan lainnya dan melakukan analisis mikrostruktur untuk meningkatkan performa beton geopolimer.

Kata Kunci: Abu sekam padi, Beton geopolimer, *Fly ash*, Konstruksi berkelanjutan, Kuat tekan, *Workability*,

1. PENDAHULUAN

Beton geopolimer telah muncul sebagai solusi inovatif dan berkelanjutan untuk mengurangi dampak lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan beton konvensional (Farooq et al., 2021; Mo et al., 2016; Shehata et al., 2022). Beton konvensional berbasis semen portland (*Ordinary Portland Cement*, OPC) merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia (Olii, Hidayat, et al., 2023; Olii, Wahab, et al., 2023), tetapi juga menjadi kontributor signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO₂) global (Olii et al., 2021), yang mencapai sekitar 8% dari total emisi (Hassan et al., 2019; Zhao et al., 2021). Dalam upaya mendukung pembangunan berkelanjutan, beton geopolimer yang menggunakan material berbasis limbah seperti abu terbang (*fly ash*) dan abu sekam padi telah menjadi alternatif yang menjanjikan (Mo et al., 2016; Part et al., 2015; Shehab et al., 2016; Zhuang et al., 2016).

Fly ash, yang merupakan limbah hasil pembakaran batubara, memiliki potensi tinggi sebagai bahan dasar beton geopolimer karena kandungan silika dan alumina yang melimpah (Bhatt et al., 2019; Wang et al., 2024). Penggunaan *fly ash* tidak hanya mengurangi ketergantungan pada semen portland, tetapi juga membantu mengelola limbah industri dengan cara yang lebih ramah lingkungan (Amran et al., 2021; Zhuang et al., 2016). Di sisi lain, abu sekam padi, limbah pertanian yang kaya akan silika amorf, menawarkan peluang tambahan untuk meningkatkan kinerja beton geopolimer (Hossain et al., 2021; Pode, 2016). Kombinasi kedua material ini memiliki potensi besar dalam menciptakan bahan konstruksi yang berdaya guna tinggi, ramah lingkungan, dan berbiaya rendah.

Namun, meskipun potensi tersebut telah banyak diidentifikasi, masih terdapat sejumlah tantangan dan kesenjangan pengetahuan yang perlu diatasi. Salah satu isu utama adalah memahami bagaimana interaksi kimia antara *fly ash* dan abu sekam padi memengaruhi sifat mekanis beton geopolimer, khususnya kuat tekan (Detphan & Chindaprasirt, 2009; Hossain et al., 2021; Joel, 2020). Reaksi geopolimerisasi, yang melibatkan proses pembentukan struktur polimerik tiga dimensi dari aluminosilikat, sangat dipengaruhi oleh komposisi material awal, rasio aktivator alkali, suhu curing, dan waktu pengikatan (Singh & Singh, 2019; Wan et al., 2017). Variabilitas dalam karakteristik *fly ash* dan abu sekam padi, seperti ukuran partikel, kadar karbon tak terbakar, serta kandungan oksida utama, dapat menyebabkan hasil yang berbeda dalam kinerja beton geopolimer (Chiranjeevi et al., 2023; Mounika et al., 2024).

Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki peran signifikan dalam menyediakan sumber silika dan alumina yang diperlukan untuk reaksi geopolimerisasi. Di sisi lain, abu sekam padi, karena sifatnya yang sangat reaktif, dapat bertindak sebagai aditif atau substituen sebagian dari *fly ash* untuk meningkatkan sifat mekanis beton (Chiranjeevi et al., 2023; Mounika et al., 2024). Beberapa penelitian melaporkan peningkatan kekuatan tekan ketika abu sekam padi

ditambahkan (Neri et al., 2023; Ramasamy, 2012), sementara penelitian lain menemukan hasil yang berlawanan, menunjukkan pentingnya optimasi proporsi campuran (Umasabor & Okovido, 2018; Zareei et al., 2017). Selain itu, parameter seperti metode curing dan rasio larutan alkali terhadap binder juga memberikan pengaruh yang besar terhadap kekuatan akhir material (Farooq et al., 2021; Part et al., 2015; Ramujee & Potharaju, 2017; Shehab et al., 2016). Namun, untuk menjaga fokus dan kedalaman analisis, penelitian ini dibatasi pada evaluasi kuat tekan beton geopolimer dengan variasi proporsi *fly ash* dan abu sekam padi, serta pengaruh rasio larutan alkali, tanpa membahas parameter lain seperti durabilitas jangka panjang atau kinerja terhadap lingkungan agresif.

Dalam konteks global, peningkatan kualitas beton geopolimer dengan memanfaatkan bahan limbah seperti *fly ash* dan abu sekam padi tidak hanya berdampak positif pada lingkungan tetapi juga memiliki implikasi ekonomi yang signifikan, terutama di negara-negara berkembang (Ramujee & Potharaju, 2017; Shehata et al., 2022; Wang et al., 2024). Negara-negara dengan produksi batubara tinggi cenderung memiliki cadangan *fly ash* yang melimpah (Ghazali et al., 2019; Kelechi et al., 2022), sementara negara-negara agraris seperti Indonesia menghasilkan abu sekam padi dalam jumlah besar setiap tahunnya (Matin et al., 2023). Dengan memanfaatkan kedua limbah ini, beton geopolimer dapat menjadi solusi yang layak untuk mengurangi ketergantungan pada material konstruksi tradisional sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari limbah industri dan pertanian (Chiranjeevi et al., 2023; Mounika et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh kombinasi *fly ash* dan abu sekam padi terhadap sifat mekanis beton geopolimer, dengan fokus pada kuat tekan. Studi ini akan menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengidentifikasi parameter optimal yang memaksimalkan kekuatan tekan beton geopolimer. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan material konstruksi berkelanjutan yang tidak hanya memenuhi standar kinerja tetapi juga mendukung agenda global untuk mengurangi emisi karbon. Dalam jangka panjang, hasil penelitian ini memiliki potensi untuk diadopsi secara luas dalam industri konstruksi, terutama di kawasan dengan aksesibilitas tinggi terhadap *fly ash* dan abu sekam padi. Selain itu, temuan ini juga diharapkan dapat membuka jalan bagi penelitian lanjutan yang mengeksplorasi bahan limbah lainnya untuk aplikasi geopolimer. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan solusi praktis untuk pengelolaan limbah tetapi juga mendorong inovasi dalam teknologi material konstruksi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

a. Beton Geopolimer sebagai Inovasi Material Konstruksi

Beton geopolimer merupakan alternatif inovatif terhadap beton berbasis semen Portland (OPC) yang dirancang untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi. Geopolimer terbentuk melalui reaksi antara material kaya aluminosilikat dengan larutan alkali, menghasilkan jaringan polimer anorganik yang kuat dan tahan terhadap berbagai kondisi agresif (Risdanareni et al., 2017). Salah satu keunggulan utama beton geopolimer adalah rendahnya emisi karbon

selama proses produksinya, dibandingkan beton konvensional, serta kemampuannya untuk memanfaatkan limbah industri sebagai bahan baku (Habert et al., 2011).

b. Fly Ash sebagai Bahan Baku Geopolimer

Fly ash, produk samping dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik, telah menjadi salah satu bahan utama dalam pengembangan beton geopolimer. Kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang tinggi dalam *fly ash* memberikan potensi reaktivitas yang besar dalam pembentukan struktur geopolimer (Imtiaz et al., 2020). Penggunaan *fly ash* tidak hanya meningkatkan kekuatan mekanik beton geopolimer, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan mengurangi limbah industri yang mencemari lingkungan (Shehata et al., 2022). Namun, ketersediaan *fly ash* sangat bergantung pada keberadaan pembangkit listrik berbahan bakar batu bara, yang di beberapa negara mulai dikurangi seiring transisi menuju energi terbarukan. Oleh karena itu, diversifikasi bahan baku alternatif menjadi penting untuk menjamin keberlanjutan produksi beton geopolimer di masa depan (Mehta & Siddique, 2016).

c. Abu Sekam Padi sebagai Substitusi dan Tambahan Fly Ash

Abu sekam padi adalah limbah pertanian yang kaya akan silika reaktif dan menunjukkan sifat pozzolanik yang kuat. Abu sekam padi dihasilkan dari pembakaran sekam padi pada suhu terkendali, sehingga kandungan silika amorfnya tetap tinggi dan siap bereaksi dengan larutan alkali dalam sistem geopolimer (Ramasamy, 2012). Penelitian oleh Hossain et al. (2021) mengungkapkan bahwa penggunaan abu sekam padi sebagai bahan penyusun geopolimer mampu meningkatkan mikrostruktur beton, memperbaiki kerapatan pori, dan pada akhirnya meningkatkan kuat tekan. Selain itu, sifat fisik abu sekam padi yang lebih halus dibandingkan *fly ash* dapat memperbaiki *workability* campuran beton geopolimer, sehingga menghasilkan produk akhir dengan kualitas lebih baik (Insyira et al., 2023; Sandhu & Siddique, 2017). Potensi abu sekam padi sebagai bahan campuran juga memberikan nilai tambah dalam pengelolaan limbah pertanian secara berkelanjutan.

d. Pengaruh Kombinasi Fly Ash dan Abu Sekam Padi terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer

Optimalisasi kuat tekan beton geopolimer sangat bergantung pada proporsi bahan *precursor* dan kondisi reaksi alkali. Beberapa studi menunjukkan bahwa pencampuran *fly ash* dengan abu sekam padi dapat meningkatkan kekuatan tekan beton secara signifikan. Nath & Sarker (2014) menemukan bahwa kombinasi *fly ash* dan material pozzolanik lain, seperti abu sekam padi, mampu mempercepat reaksi geopolimerisasi dan menghasilkan produk akhir dengan kekuatan mekanik lebih tinggi. Abdulkareem & Ramli (2015) menambahkan bahwa rasio molaritas larutan alkali, rasio *fly ash* terhadap abu sekam padi, serta kondisi *curing* (suhu dan waktu)

merupakan faktor-faktor kunci yang menentukan performa beton geopolimer. Penyesuaian terhadap parameter-parameter ini memungkinkan peningkatan ikatan dalam matriks beton dan mengurangi porositas, sehingga menghasilkan beton dengan daya tahan dan kuat tekan optimal.

3. METODOLOGI PENELITIAN

a. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Terpadu Universitas Gorontalo pada periode Januari hingga Mei 2025.

b. Uji Karakteristik Agregat

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menguji karakteristik agregat kasar dan halus sebagai bahan utama dalam pembuatan beton geopolimer. Uji laboratorium dilakukan sesuai dengan standar nasional Indonesia (SNI) yang relevan, untuk memastikan kualitas dan kesesuaian material. Berikut langkah-langkah yang dilakukan:

- 1) Gradasi: Dilakukan dengan metode pengayakan sesuai SNI 03-1968 (1990) untuk menentukan distribusi ukuran butir agregat.
- 2) Kadar Air: Pengujian kadar air agregat dilakukan sesuai SNI 03-1971 (1990), menggunakan metode pengeringan hingga berat konstan.
- 3) Berat Volume: Berat volume agregat diuji berdasarkan SNI 1973 (2016), dengan prosedur penimbangan dalam kondisi longgar dan padat.
- 4) *Specific Gravity* dan Absorpsi: Dilakukan sesuai SNI 1968 (2008), untuk mengukur berat jenis dan daya serap air agregat.
- 5) Kadar Lumpur: Dilakukan sesuai SNI 03-4428 (1997) untuk memastikan tingkat kebersihan pasir dari partikel lumpur.
- 6) Keausan: Uji keausan dilakukan menggunakan mesin Los Angeles berdasarkan SNI 03-2417 (1991) untuk mengetahui tingkat ketahanan abrasi agregat kasar.

c. Uji Karakteristik *Fly Ash* dan Abu Sekam

- 1) Berat Volume: Berat volume *fly ash* dan abu sekam diuji berdasarkan SNI 1973 (2016), dengan prosedur penimbangan dalam kondisi longgar dan padat.
- 2) *Specific Gravity* dan Absorpsi: Dilakukan sesuai SNI 1968 (2008), untuk mengukur berat jenis dan daya serap air *fly ash* dan abu sekam.
- 3) Gradasi: material *fly ash* dan abu sekam disaring menggunakan saringan nomor 100 (ukuran *mesh* 0,15 mm). Hanya material yang lolos saringan tersebut yang digunakan dalam penelitian ini untuk memastikan distribusi ukuran partikel yang halus dan reaktif

d. Metode Pembuatan Binder

Pembuatan binder untuk beton geopolimer dilakukan dengan langkah-langkah berikut, yang mengintegrasikan *fly ash* dan abu sekam padi sebagai material utama, serta larutan alkali aktivator sebagai pengikat:

- 1) Persiapan Larutan Alkali Aktivator:
 - a) Larutkan NaOH dalam air menggunakan molaritas 12 M. Pastikan pelarutan dilakukan secara perlahan untuk menghindari reaksi eksotermik yang berlebihan.
 - b) Ukur NaOH dan Na_2SiO_3 dengan perbandingan 1:2,5.
 - c) Campurkan larutan NaOH dengan Na_2SiO_3 , lalu aduk hingga larutan benar-benar homogen menggunakan pengaduk mekanis atau manual.
- 2) Proses Penuaan Larutan: biarkan larutan alkali aktivator yang telah homogen selama 24 jam pada suhu ruang. Proses ini bertujuan untuk memastikan stabilitas reaksi kimia awal dan kesiapan larutan untuk digunakan dalam campuran binder.
- 3) Pencampuran Binder:
 - a) Campurkan *fly ash* dan abu sekam padi dengan larutan alkali aktivator dalam wadah pencampuran. Gunakan perbandingan material sesuai desain campuran beton geopolimer yang telah dirancang.
 - b) Aduk campuran hingga homogen, sehingga tidak ada gumpalan material kering atau larutan alkali yang terpisah. Proses pencampuran dapat menggunakan mixer mekanis untuk hasil yang lebih merata.
- 4) Penyimpanan dan Kesiapan: setelah homogen, binder siap digunakan untuk pembuatan beton geopolimer. Gunakan campuran segera untuk menghindari pengeringan atau pengerasan prematur.

e. Pembuatan Benda Uji Beton Geopolimer

- 1) Persiapan Material: binder, agregat kasar, agregat halus, semen, dan air
- 2) Perancangan Campuran: tentukan perbandingan bahan berdasarkan desain campuran beton geopolimer berdasarkan SNI 7656 (2012). Pastikan rasio binder, agregat, larutan alkali, dan air sesuai dengan kebutuhan kuat tekan yang diinginkan. Penelitian ini menggunakan empat variasi komposisi material geopolimer berdasarkan persentase campuran antara *fly ash* dan abu sekam padi, yaitu 100%:0%, 80%:20%, 70%:30%, dan 50%:50%. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan ukuran tinggi 30 cm dan diameter 15 cm. Untuk setiap variasi campuran, dibuat lima benda uji, sehingga total terdapat 20 sampel yang diuji.
- 3) Pencampuran
 - a) Pengadukan Awal: campurkan agregat kasar dan agregat halus dalam mixer hingga merata.
 - b) Penambahan Binder: tambahkan binder yang telah disiapkan ke dalam campuran agregat. Aduk perlahan hingga campuran merata.
 - c) Penyesuaian Konsistensi tambahkan air sedikit demi sedikit untuk mencapai *workability* yang diinginkan. Pastikan campuran homogen tanpa gumpalan.
- 4) Penuangan ke Cetakan
 - a) Siapkan cetakan silinder sesuai ukuran standar.
 - b) Lapisi cetakan dengan minyak pelumas tipis untuk memudahkan pelepasan benda uji.
 - c) Tuangkan campuran beton geopolimer ke dalam cetakan secara bertahap.

- d) Padatkan setiap lapisan dengan batang pemadat atau vibrator untuk menghilangkan udara yang terperangkap.
- 5) Pengujian *slump* beton: mengukur konsistensi atau workability beton segar untuk memastikan campuran memiliki kemampuan alir yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi berdasarkan SNI 1972 (2008).
- 6) Perawatan (*Curing*) berdasarkan SNI 03-2847-2002:
 - a) Pelepasan Cetakan: Setelah 24 jam, lepaskan benda uji dari cetakan dengan hati-hati.
 - b) Perawatan Suhu: Simpan benda uji di ruang curing dengan suhu yang dikontrol (biasanya 60–80°C) selama 24 jam untuk mempercepat proses geopolimerisasi.
 - c) Perawatan Lanjut: Setelah curing awal, tempatkan benda uji pada kondisi lingkungan normal hingga waktu pengujian.
- 7) Pengujian Kuat Tekan: setelah mencapai usia tertentu (misalnya 7 hari atau 28 hari), uji benda uji menggunakan mesin uji kuat tekan untuk mengetahui performa beton geopolimer berdasarkan SNI 03-2847-2002.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

a. Hasil Pengujian Agregat Kasar, Halus, *Fly Ash*, dan Abu Sekam

Tabel 1 memberikan gambaran rinci mengenai sifat fisik dan mekanik agregat kasar, agregat halus, *fly ash*, dan abu sekam padi. Modulus kehalusan agregat kasar sebesar 8,59 menunjukkan bahwa material tersebut memiliki gradasi yang kasar dan cocok untuk campuran beton, sedangkan modulus kehalusan agregat halus sebesar 2,78 mengindikasikan gradasi agregat halus yang baik untuk menciptakan campuran beton yang homogen. Kadar air agregat kasar sebesar 1,32% lebih rendah dibandingkan agregat halus yang memiliki kadar air 4,93%, menunjukkan bahwa pasir mengandung lebih banyak air. Untuk berat jenis (*apparent specific gravity*), agregat kasar dan halus masing-masing memiliki nilai 2,64 dan 2,65, sedangkan *fly ash* dan abu sekam memiliki nilai yang lebih rendah, yaitu 2,14 dan 1,21, mencerminkan densitas material pengikat yang lebih ringan dibandingkan agregat.

Berat jenis dalam kondisi SSD (*saturated surface dry*) untuk agregat kasar dan halus masing-masing sebesar 2,56 dan 2,58, sementara berat jenis dalam kondisi kering masing-masing adalah 2,51 dan 2,54. Nilai absorpsi agregat kasar sebesar 2,02% dan agregat halus sebesar 1,52% menunjukkan kemampuan agregat untuk menyerap air, yang penting dalam perancangan campuran beton. Berat volume agregat kasar dan halus masing-masing adalah 1,46 kg/l dan 1,52 kg/l, sementara *fly ash* dan abu sekam memiliki berat volume yang jauh lebih rendah, yaitu 1,12 kg/l dan 0,60 kg/l, menjadikan keduanya bahan yang potensial untuk beton ringan.

Kadar lumpur agregat kasar dan halus masing-masing sebesar 0,67% dan 0,99% menunjukkan bahwa material ini bersih dan layak digunakan. Nilai keausan agregat kasar sebesar 23,14% menunjukkan ketahanan terhadap abrasi yang masih dalam batas yang dapat diterima untuk beton struktural. Secara keseluruhan, hasil

pengujian ini menunjukkan bahwa agregat kasar, agregat halus, fly ash, dan abu sekam memiliki karakteristik yang memenuhi standar untuk digunakan sebagai bahan penyusun beton, dengan fly ash dan abu sekam memberikan potensi tambahan dalam menghasilkan beton yang lebih ringan dan ramah lingkungan.

Tabel 1. Karakteristik material penyusun beton

Karakteristik	Agregat Kasar	Agregat Halus	<i>Fly Ash</i>	Abu Sekam
Modulus kehalusan	8,59	2,78	-	-
Kadar Air (%)	1,32	4,93	-	-
<i>Apparent spesific grafity</i>	2,64	2,65	2,14	1,21
<i>Bulk specific grafity (SSD basic)</i>	2,56	2,58	-	-
<i>Bulk specific grafity (on dry basic)</i>	2,51	2,54	-	-
Absorbsi (%)	2,02	1,52	-	-
Berat volume (kg/l)	1,46	1,52	1,12	0,60
Kadar lumpur (%)	0,67	0,99	-	-
Keausan (%)	23,14	-	-	-

b. Perbandingan Komposisi Material Beton

Tabel 2 menggambarkan perbandingan komposisi material beton berdasarkan variasi proporsi *fly ash* dan abu sekam padi dalam campuran. Pada variasi 100:0 (hanya *fly ash* tanpa abu sekam padi), komposisi *fly ash* sebesar 1,000, aktivator sebesar 0,403, agregat halus sebesar 4,436, dan agregat kasar sebesar 2,404. Ketika abu sekam padi mulai ditambahkan dalam proporsi 20% (80:20), jumlah *fly ash* tetap 1,000, sementara ASP sebesar 0,147, aktivator meningkat menjadi 0,503, agregat halus berkurang menjadi 3,549, dan agregat kasar meningkat menjadi 3,005.

Pada variasi 70:30, *fly ash* tetap 1,000, abu sekam padi meningkat menjadi 0,252, aktivator bertambah menjadi 0,575, agregat halus berkurang lebih lanjut menjadi 3,105, dan agregat kasar bertambah menjadi 3,434. Pada proporsi 50:50, *fly ash* masih 1,000, ASP mencapai nilai tertinggi sebesar 0,588, aktivator meningkat signifikan menjadi 0,805, agregat halus berkurang drastis menjadi 2,218, dan agregat kasar mencapai nilai tertinggi sebesar 4,808.

Tabel 2. Perbandingan Komposisi Material Beton

Var. <i>Fly Ash</i> dan Abu Sekam Padi (%)	<i>Fly Ash</i>	Abu Sekam Padi	Aktivator	Agr. Halus	Agr. Kasar
100 : 0	1,000	0,000	0,403	4,436	2,404
80 : 20	1,000	0,147	0,503	3,549	3,005
70 : 30	1,000	0,252	0,575	3,105	3,434
50 : 50	1,000	0,588	0,805	2,218	4,808

Secara keseluruhan, Tabel 2 menunjukkan bahwa dengan peningkatan proporsi abu sekam padi, kebutuhan aktivator meningkat, sementara penggunaan agregat halus cenderung berkurang, dan agregat kasar bertambah. Hal ini menggambarkan pengaruh proporsi bahan pengikat terhadap keseimbangan komposisi material beton.

c. Pengaruh Proporsi *Fly Ash* dan Abu Sekam Padi Terhadap Nilai *Slump*, Kuat Tekan Rerata, dan Kuat Tekan Karakteristik Beton Geopolimer

Tabel 3 dan Gambar 1 memberikan gambaran mengenai pengaruh proporsi *fly ash* dan abu sekam padi terhadap nilai *slump*, kuat tekan rerata, dan kuat tekan karakteristik beton geopolimer. Pada variasi 100:0, di mana material pengikat sepenuhnya terdiri dari *fly ash*, nilai *slump* mencapai 8,0 cm, menunjukkan tingkat *workability* yang cukup baik. Kuat tekan rerata pada variasi ini adalah 23,13 MPa, sementara kuat tekan karakteristik mencapai 22,44 MPa, menjadikannya campuran dengan performa terbaik dalam hal kekuatan.

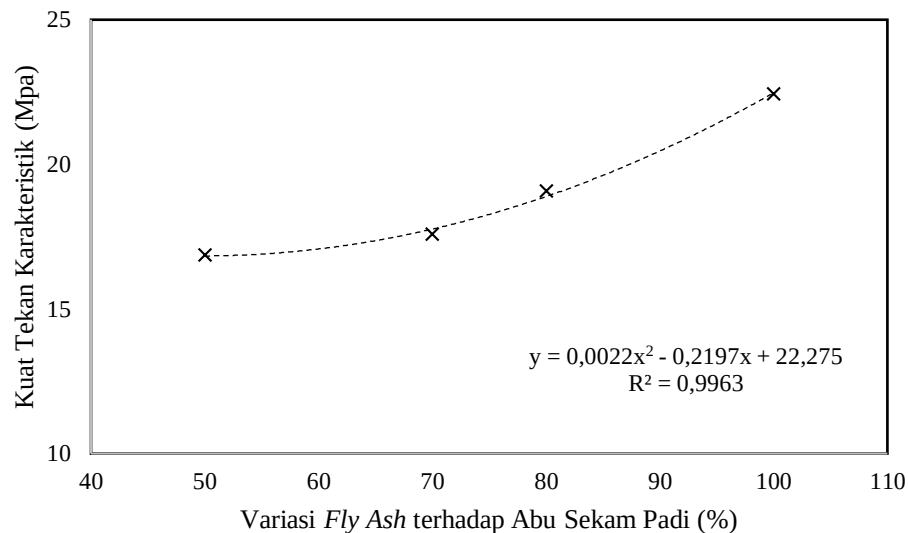
Dengan penambahan abu sekam padi sebesar 20% pada variasi 80:20, nilai *slump* mengalami sedikit penurunan menjadi 7,5 cm, mengindikasikan penurunan *workability*. Hal ini diikuti oleh penurunan kuat tekan rerata menjadi 19,57 MPa dan kuat tekan karakteristik menjadi 19,07 MPa. Penurunan yang lebih signifikan terlihat pada variasi 70:30, di mana nilai *slump* menurun menjadi 7,0 cm, kuat tekan rerata menjadi 18,09 MPa, dan kuat tekan karakteristik menjadi 17,58 MPa. Penambahan abu sekam padi hingga 50% pada variasi 50:50 menghasilkan nilai *slump* terendah, yaitu 5,5 cm, yang menunjukkan penurunan kelecakan campuran secara drastis. Pada variasi ini, kuat tekan rerata sebesar 17,20 MPa dan kuat tekan karakteristik sebesar 16,87 MPa menjadi yang terendah di antara seluruh variasi.

Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan proporsi abu sekam padi dalam campuran cenderung mengurangi nilai *slump*, yang mencerminkan penurunan *workability*, serta menurunkan kuat tekan rerata dan kuat tekan karakteristik beton. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh sifat abu sekam padi yang kurang reaktif dibandingkan *fly ash*, sehingga berdampak pada pengikatan dan kekuatan akhir beton geopolimer. Temuan ini menegaskan bahwa meskipun abu sekam padi memiliki potensi sebagai material pengikat tambahan, penggunaannya perlu diperhatikan untuk memastikan kinerja beton tetap optimal.

Tabel 3. Hasil Uji Kuat Tekan Karakteristik Beton

Var. <i>Fly Ash</i> dan Abu Sekam Padi (%)	Nilai <i>Slump</i> (cm)	Kuat Tekan Rerata (Mpa)	Kuat Tekan Karakteristik (Mpa)
100 : 0	8,0	23,13	22,44
80 : 20	7,5	19,57	19,07
70 : 30	7,0	18,09	17,58
50 : 50	5,5	17,20	16,87

*Kuat tekan rencana: 16,28 Mpa



Gambar 1. Kuat Tekan Karakteristik Beton

Penelitian ini dapat dijelaskan dengan memperhatikan sifat fisik dan kimia material yang digunakan. *Fly ash* memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi, yang bereaksi secara efektif dengan larutan alkali untuk membentuk struktur geopolimer yang kuat (Amran et al., 2021; Shehab et al., 2016; Wang et al., 2024). Sebaliknya, abu sekam padi, meskipun juga mengandung silika, memiliki struktur amorf yang kurang reaktif dibandingkan *fly ash*. Hal ini sejalan dengan temuan beberapa peneliti, yang menjelaskan bahwa kinerja geopolimer sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia bahan dasar, terutama kandungan silika dan alumina yang dapat larut dalam larutan alkali (Amran et al., 2021; Chiranjeevi et al., 2023; Shehab et al., 2016; Wang et al., 2024).

Selain itu, abu sekam padi memiliki berat jenis yang lebih rendah dibandingkan *fly ash* (1,21 vs. 2,14) dan karakteristik porositas yang lebih tinggi, yang dapat memengaruhi distribusi material dalam campuran beton. Porositas yang lebih tinggi pada abu sekam padi berkontribusi terhadap peningkatan kebutuhan air atau larutan alkali (de Souza Rodrigues et al., 2006; Xu et al., 2015), sehingga menurunkan *workability* campuran seperti yang ditunjukkan oleh penurunan nilai *slump*. Penurunan *workability* ini juga diamati dalam penelitian Hardjito dan Rangan (2005), yang menemukan bahwa material dengan porositas tinggi cenderung mengurangi kelecakan campuran beton geopolimer (Chen et al., 2022; Raza et al., 2024).

Penurunan kuat tekan pada campuran dengan proporsi abu sekam padi yang lebih tinggi juga dapat dijelaskan oleh pengurangan jumlah *fly ash* yang berfungsi sebagai binder utama. *Fly ash*, dengan kandungan mineral yang lebih reaktif, berperan penting dalam pembentukan matriks geopolimer yang kuat (Risdanareni et al., 2017). Dengan berkurangnya *fly ash*, struktur geopolimer yang dihasilkan menjadi kurang padat, sehingga menurunkan kekuatan mekanis beton. Penemuan serupa dilaporkan oleh Ganta et al (2024) dalam (Mounika et al., 2024) yang menunjukkan bahwa material tambahan seperti abu sekam perlu digunakan secara

hati-hati agar tidak mengganggu reaktivitas binder utama.

Penelitian ini mengungkap bahwa *fly ash* adalah binder utama unggul untuk beton geopolimer, sedangkan abu sekam padi dapat digunakan untuk keberlanjutan lingkungan dengan proporsi terkendali. Penambahan abu sekam padi memengaruhi *workability* dan kekuatan beton (Amran et al., 2021; Joel, 2020), menuntut penyesuaian campuran dan penggunaan *superplasticizer*. Hasil ini menyoroti pentingnya optimasi desain beton, khususnya kombinasi material binder dengan sifat saling melengkapi. Penelitian ini mendukung literatur tentang penggunaan material lokal dan memberikan dasar untuk pengembangan formulasi beton geopolimer ramah lingkungan, terutama di wilayah dengan bahan lokal melimpah seperti *fly ash* dan abu sekam padi, serta penelitian lanjutan terkait optimasi kekuatan mekanis.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Studi ini menunjukkan pengaruh komposisi *fly ash* dan abu sekam padi pada beton geopolimer, dengan hasil yang menunjukkan *fly ash* sebagai binder utama unggul dengan kuat tekan rerata tertinggi sebesar 23,13 MPa pada komposisi 100% *fly ash*. Penambahan abu sekam padi dalam proporsi 20%, 30%, dan 50% menurunkan kuat tekan rerata menjadi masing-masing 19,57 MPa, 18,09 MPa, dan 17,20 MPa, dengan nilai *slump* berkurang dari 8,0 cm (100% *fly ash*) menjadi 5,5 cm (50% abu sekam padi). Abu sekam padi dapat digunakan untuk keberlanjutan lingkungan, tetapi hanya dalam proporsi terkendali agar tidak signifikan menurunkan kekuatan beton. Penurunan *workability* pada proporsi abu sekam padi yang tinggi menunjukkan pentingnya penyesuaian pencampuran, seperti penggunaan *superplasticizer*.

Hasil ini menegaskan bahwa desain campuran beton geopolimer yang optimal, dengan mempertimbangkan kombinasi material binder, adalah kunci untuk menghasilkan beton berkinerja baik. Penelitian ini mendukung literatur terkait material lokal seperti *fly ash* dan abu sekam padi, dan memberikan dasar pengembangan beton geopolimer ramah lingkungan dengan kuat tekan dan *workability* yang terukur. Temuan ini relevan untuk aplikasi pada wilayah dengan ketersediaan bahan lokal melimpah dan kebutuhan konstruksi berkelanjutan.

Penelitian ini dapat ditingkatkan dengan mengeksplorasi pengaruh variasi molaritas larutan alkali dan penggunaan *superplasticizer* untuk mengoptimalkan *workability*. Selain itu, analisis mikrostruktur melalui SEM atau XRD dapat memberikan pemahaman mendalam mengenai interaksi material binder, sehingga menghasilkan beton geopolimer dengan performa mekanis yang lebih unggul dan konsisten.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Gorontalo atas dukungan dana yang memungkinkan terlaksananya penelitian ini. Dukungan tersebut sangat berarti dalam pengembangan riset material konstruksi ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulkareem, O. A., & Ramli, M. (2015). Optimization of Alkaline Activator Mixing and Curing Conditions for A fly Ash-Based Geopolymer Paste System. *Modern Applied Science*, 9(12), 61. <https://doi.org/10.5539/mas.v9n12p61>
- Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*, 270, 121857. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>
- Bhatt, A., Priyadarshini, S., Acharath Mohanakrishnan, A., Abri, A., Sattler, M., & Techapaphawit, S. (2019). Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00263. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00263>
- Chen, S., Ruan, S., Zeng, Q., Liu, Y., Zhang, M., Tian, Y., & Yan, D. (2022). Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review. *Construction and Building Materials*, 328(February), 127064. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127064>
- Chiranjeevi, K., Vijayalakshmi, M. M., & Praveenkumar, T. R. (2023). Investigation of fly ash and rice husk ash-based geopolymer concrete using nano particles. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 13(1), 839–846. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01916-2>
- de Souza Rodrigues, C., Ghavami, K., & Stroeven, P. (2006). Porosity and water permeability of rice husk ash-blended cement composites reinforced with bamboo pulp. *Journal of Materials Science*, 41(21), 6925–6937. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0217-2>
- Detphan, S., & Chindaprasirt, P. (2009). Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(6), 720–726. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1674-4799\(10\)60019-2](https://doi.org/10.1016/S1674-4799(10)60019-2)
- Farooq, F., Jin, X., Faisal Javed, M., Akbar, A., Izhar Shah, M., Aslam, F., & Alyousef, R. (2021). Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 306(August), 124762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762>
- Ghazali, N., Muthusamy, K., & Wan Ahmad, S. (2019). Utilization of Fly Ash in Construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 601(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/601/1/012023>
- Habert, G., d’Espinoise de Lacaille, J. B., & Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229–1238. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012)
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704–728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.051>

- Hossain, S. S., Roy, P. K., & Bae, C. J. (2021). Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymers: A review. *Construction and Building Materials*, 310(August), 125218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125218>
- Imtiaz, L., Ur Rehman, S. K., Memon, S. A., Khan, M. K., & Javed, M. F. (2020). A review of recent developments and advances in eco-friendly geopolymer concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(21), 1–56. <https://doi.org/10.3390/app10217838>
- Insyira, A. H., Wijayanti, Y., Setyandito, O., Putra, D. P., Adi Soekotjo, N., Sasongko, E., & Anda, M. (2023). Study of using Coal Fly Ash (CFA) and Rice Husk Ash (RHA) on the Compressive Strength of Geopolymer Concrete. *E3S Web of Conferences*, 426, 3–7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342601011>
- Joel, S. (2020). Compressive strength of concrete using fly ash and rice husk ash: A review. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 6(7), 1400–1410. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091556>
- Kelechi, S. E., Adamu, M., Uche, O. A. U., Okokpujie, I. P., Ibrahim, Y. E., & Obianyo, I. I. (2022). A comprehensive review on coal fly ash and its application in the construction industry. *Cogent Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2114201>
- Matin, H. H. A., Syafrudin, S., & Suherman, S. (2023). Rice Husk Waste: Impact on Environmental Health and Potential as Biogas. *Kemas*, 18(3), 431–436. <https://doi.org/10.15294/kemas.v18i3.42467>
- Mehta, A., & Siddique, R. (2016). An overview of geopolymers derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 127, 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.136>
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016). Structural performance of reinforced geopolymer concrete members: A review. *Construction and Building Materials*, 120, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.088>
- Mounika, G., Priyanka, M., Rajasri, Y., Reddy, T. S., Srinanda, S., & Reddy, G. S. (2024). Evaluation of Mechanical Characteristics of concrete incorporating Fly Ash and Rice Husk Ash as sustainable alternatives. *E3S Web of Conferences*, 559. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455904028>
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- Neri, A. C., Baguhin, I. A., & Cabahug, R. R. (2023). An Investigation on the Compressive Strength of Concrete with Rice Husk Ash as Cement Replacement and Addition of Chemical Admixtures. *Mindanao Journal of Science and Technology*, 21(1), 224–236. <https://doi.org/10.61310/mndjstict.0987.23>
- Olii, M. R., Hidayat, A. S., Saliko, M., Santoso, T., Hippy, M. A., & Pakaya, R. (2023). Environmentally Friendly Concrete Using Waste Glass Powder (WGP) As a Partial Substitute of Cement. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 140–146.
- Olii, M. R., Poe, I. ., Ichsan, I., & Olii, A. (2021). Limbah Kaca Sebagai Penganti Sebagian Agregat Halus Untuk Beton Ramah Lingkungan. *Teras Jurnal*,

- 11(1), 113–124. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.29103/tj.v11i1.407>
- Olli, M. R., Wahab, A. A., Ichsan, I., Djau, R. A., & Nento, S. (2023). Beton Hijau Menggunakan Fly ash sebagai Substitusi Parsial Semen. *Siklus : Jurnal Teknik Sipil: Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 11–20.
- Part, W. K., Ramli, M., & Cheah, C. B. (2015). An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 77, 370–395. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.065>
- Pode, R. (2016). Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, - 4031485. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.051>
- Ramasamy, V. (2012). Compressive strength and durability properties of Rice Husk Ash concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(1), 93–102. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-0779-2>
- Ramujee, K., & Potharaju, M. (2017). Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2937–2945. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.175>
- Raza, M. H., Khan, M., & Zhong, R. Y. (2024). Strength, porosity and life cycle analysis of geopolymer and hybrid cement mortars for sustainable construction. *Science of the Total Environment*, 907(September 2023), 167839. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167839>
- Risdanareni, P., Puspitasari, P., & Jaya, E. J. (2017). Chemical and Physical Characterization of Fly Ash as Geopolymer Material. *MATEC Web of Conferences*, 97. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701031>
- Sandhu, R. K., & Siddique, R. (2017). Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 153, 751–764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.165>
- Shehab, H. K., Eisa, A. S., & Wahba, A. M. (2016). Mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete with full and partial cement replacement. *Construction and Building Materials*, 126, 560–565. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.059>
- Shehata, N., Mohamed, O. A., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. G. (2022). Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. *Science of the Total Environment*, 836(April), 155577. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155577>
- Singh, J., & Singh, S. P. (2019). Geopolymerization of solid waste of non-ferrous metallurgy – A review. *Journal of Environmental Management*, 251(September), 109571. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109571>
- Umasabor, R. I., & Okovido, J. O. (2018). Fire resistance evaluation of rice husk ash concrete. *Heliyon*, 4(12), e01035. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01035>
- Wan, Q., Rao, F., Song, S., García, R. E., Estrella, R. M., Patiño, C. L., & Zhang, Y. (2017). Geopolymerization reaction, microstructure and simulation of metakaolin-based geopolymers at extended Si/Al ratios. *Cement and Concrete Composites*, 79, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.014>
- Wang, M., Chen, D., Wang, H., & Gao, W. (2024). A review on fly ash high-value

- synthesis utilization and its prospect. *Green Energy and Resources*, 2(1), 100062. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2024.100062>
- Xu, W., Lo, Y. T., Ouyang, D., Memon, S. A., Xing, F., Wang, W., & Yuan, X. (2015). Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 89, 90–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.030>
- Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*, 7(October 2016), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.001>
- Zhao, J., Tong, L., Li, B., Chen, T., Wang, C., Yang, G., & Zheng, Y. (2021). Eco-friendly geopolymers materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 307(135), 127085. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127085>
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>