



Transformasi Limbah Jadi Kekuatan: Potensi Fine Coal dan Abu Sekam Padi dalam Pengembangan Beton Geopolimer

(Transforming Waste into Strength: The Potential of Fine Coal and Rice Husk Ash in the Development of Geopolymer Concrete)

Indra Nuryanneti¹, Ni Wayan Desi², Putra³, Dinda Zahra⁴

^{1,2,3,4} Akademi Komunitas Industri Pertambangan Bukit Asam, Indonesia

¹indranuryanneti@akipba.ac.id, ²niwayan.dp@akipba.ac.id, ³putra@akipba.ac.id, ⁴indazahra270707@gmail.com,

Penulis Korespondensi: indra nuryanneti | **Email:** indranuryanneti@akipba.ac.id

Diterima (*Received*): D/M/Y Direvisi (*Revised*): D/M/Y Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): D/M/Y

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji pemanfaatan limbah industri pertambangan dan pertanian berupa fine coal (FC) dan abu sekam padi (ASP) sebagai material pengganti semen dalam pembuatan beton geopolimer yang diaktivasi menggunakan larutan alkali berupa natrium silikat dan natrium hidroksida (caustic soda). Akumulasi limbah industri yang tidak termanfaatkan secara optimal berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, sementara di sisi lain industri konstruksi masih sangat bergantung pada semen konvensional yang berkontribusi signifikan terhadap emisi CO₂. Oleh karena itu, pendekatan berbasis geopolimer menjadi alternatif yang relevan untuk mendukung pembangunan berkelanjutan. Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan pemanfaatan limbah industri sebagai bahan geopolimer, masih terdapat research gap terkait pemanfaatan fine coal sebagai prekursor utama, khususnya dalam kombinasi sinergis dengan abu sekam padi serta pengaruh variasi komposisinya terhadap kuat tekan beton. Selain itu, studi mengenai pengaruh variasi kadar air pada sistem berbasis fine coal murni juga masih terbatas. Penelitian ini menawarkan novelty berupa pemanfaatan kombinasi FC dan ASP dengan variasi komposisi yang spesifik, yaitu A (70% FC : 30% ASP), B (30% FC : 70% ASP), serta evaluasi sistem berbasis FC murni dengan variasi penambahan air (C: 7–10 ml; D: 25 ml). Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari untuk menilai performa mekanik beton geopolimer yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi komposisi material berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan, di mana sampel A menghasilkan nilai tertinggi dengan rata-rata kuat tekan sebesar 35 fc. Temuan ini mengindikasikan bahwa kombinasi optimal antara fine coal dan abu sekam padi mampu meningkatkan kinerja beton geopolimer, sehingga berpotensi diaplikasikan dalam konstruksi sesuai dengan mutu yang disyaratkan. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pemanfaatan limbah FC dan ASP tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan limbah industri, tetapi juga mendukung pengembangan material konstruksi ramah lingkungan sebagai alternatif pengganti semen konvensional.

Kata Kunci: abu sekam padi, beton geopolimer, fine coal, limbah, uji kuat tekan.

ABSTRACT

This research examines the use of mining and agricultural waste in the form of fine coal (FC) and rice husk ash (ASP) as cement substitutes in the production of geopolymer concrete activated using an alkaline solution of sodium silicate and sodium hydroxide (caustic soda). The accumulation of underutilized industrial waste has the potential to cause environmental pollution, while the construction industry remains heavily reliant on conventional cement, which contributes significantly to CO₂ emissions. Therefore, a geopolymer-based approach is a relevant alternative to support sustainable development. Although various studies have reported the use of industrial waste as a geopolymer material, a research gap remains regarding the use of fine coal as the main precursor, particularly in synergistic combinations with rice husk ash and the effect of composition variations on concrete compressive strength. Furthermore, studies on the effect of variations in water content in pure fine coal-based systems are also limited. This research offers a novel approach in the form of utilizing a combination of FC and ASP with specific composition variations: A (70% FC: 30% ASP), B (30% FC: 70% ASP), and an evaluation of a pure FC-based system with varying water additions (C: 7–10 ml; D: 25 ml). Compressive strength testing was conducted at 28 days to assess the mechanical performance of the resulting geopolymer concrete. The results showed that variations in material composition significantly affected compressive strength, with sample A producing the highest value, with an average compressive strength of 35 fc. These findings indicate that the optimal combination of fine coal and rice husk ash can improve the performance of geopolymer concrete, potentially enhancing its application in construction to meet the required quality standards.

Overall, this research confirms that the utilization of FC and ASP waste not only contributes to industrial waste reduction but also supports the development of environmentally friendly construction materials as an alternative to conventional cement.

Keywords: rice husk ash, geopolymer concrete, fine coal, waste, compressive strength test.

© Author(s) 202x. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Fine Coal (FC) dan Abu Sekam Padi (ASP) merupakan limbah padat yang berasal dari aktivitas pertambangan dan pertanian. Kedua jenis limbah ini umumnya belum dimanfaatkan secara optimal, sehingga berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, termasuk degradasi kualitas tanah dan air (Cong & Cheng, 2021, Athira et al., 2021). Oleh karena itu, pemanfaatan limbah tersebut sebagai bahan baku dalam pembuatan geopolimer menjadi salah satu pendekatan berkelanjutan yang sejalan dengan perkembangan teknologi beton ramah lingkungan

Naufal et al., (2024) menyatakan bahwa abu sekam padi diketahui memiliki kandungan silika (SiO_2) yang tinggi, sementara *fine coal* mengandung karbon serta mineral residu hasil pembakaran. Kombinasi kedua material ini berpotensi membentuk struktur matriks geopolimer yang kuat apabila diaktivasi menggunakan larutan alkali seperti natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3), sehingga meningkatkan sifat mekanik material yang dihasilkan.

Limbah industri *fine coal* dan abu sekam padi dapat dimanfaatkan sebagai beton geopolimer untuk mengurangi dampak negatif pada lingkungan. Geopolimer adalah material berbasis aluminosilikat (Si-Al) yang terbentuk melalui *geopolymerization*. Memiliki: kekuatan tinggi, ketahanan terhadap asam, sulfat, dan suhu ekstrem, mengurangi emisi CO_2 secara signifikan dibanding semen OPC., sangat potensial sebagai material konstruksi masa depan (Luhar & Luhar, 2022). Selain itu, pemanfaatan limbah padat dari sektor pertanian dan pertambangan sebagai bahan baku geopolimer terbukti dapat mengurangi pencemaran lingkungan sekaligus menghasilkan material dengan kinerja yang baik (Ren et al., 2021). Beton geopolimer sebagai alternatif ramah lingkungan pengganti beton konvensional. Salah satu solusi untuk memanfaatkan limbah tersebut Oktaviastuti et al. 2021. Berbeda dengan beton biasa yang menggunakan semen *portland* yang menimbulkan permasalahan berupa emisi gas karbondioksida (CO_2). Beton geopolimer memanfaatkan bahan-bahan berbasis *aluminosilicate* yang digunakan secara kimia, sesuai untuk aktivasi geopolimer (Rangan, 2020).

Dengan demikian, penggunaan limbah ini ke dalam beton geopolimer tidak hanya mengatasi masalah penumpukan limbah tetapi juga mendukung konstruksi hijau. Menurut (Chandra, 2021) *fine coal* dengan kadar karbon tertentu mampu meningkatkan sifat mekanik geopolimer, sementara abu sekam padi yang bersifat

pozzolanik, yaitu mengandung silika sangat membantu untuk reaksi polimerisasi.

Penggunaan limbah *fine coal* dan abu sekam padi sebagai bahan campuran pada beton geopolimer dapat membantu mengurangi ketergantungan pada semen yang dapat menyumbang emisi CO_2 pada setiap penggunaannya. *Fine coal* dihasilkan dari industri yang menggunakan batubara sebagai salah satu bahannya. *Fine coal* dihasilkan dari proses peremukan batubara yang kemudian dikeringkan. Proses ini akan menghasilkan debu atau partikel-partikel dengan ukuran sangat kecil dari batubara yang dikenal sebagai *fine coal*. Industri yang menghasilkan *fine coal* kerap kali tidak memanfaatkannya dan terbuang begitu saja pada kolam penampungan. Hal ini *menyebabkan fine coal* menjadi limbah yang menumpuk dan menyebabkan masalah lingkungan seperti pencemaran udara dan tanah. Abu sekam padi merupakan hasil sampingan dari industri pertanian pada proses penggilingan padi yang kemudian menghasilkan sekam padi dan juga beras. Sekam padi yang dibakar dengan suhu tinggi akan menghasilkan abu sekam padi yang menjadi salah satu sumber silika, namun abu sekam padi sering kali dianggap sebagai limbah yang tidak berguna karena tidak dimanfaatkan dengan optimal. Dengan mengubah kedua limbah tersebut menjadi beton geopolimer yang menggunakan *fine coal* dan abu sekam padi sebagai pengganti semen dapat mengurangi jumlah kedua limbah tersebut dan menghindari penumpukan pada tempat pembuangan akhir.

Residu batubara terbukti dapat dimanfaatkan sebagai bahan penyusun geopolimer yang efektif, tetapi performanya sangat bergantung pada karakteristik material dan kondisi aktivasi alkali (Özkılıç et al., 2023). Pembuatan beton geopolimer dengan mencampurkan *fine coal* dan abu sekam padi dapat mengurangi jumlah kedua limbah tersebut dengan mengubahnya menjadi sesuatu yang bermanfaat. Kualitas *fine coal* dan abu sekam padi termasuk kandungan mineral dan ukuran partikel, akan memberikan pengaruh terhadap performa beton geopolimer. Ketersediaan *fine coal* dan abu sekam padi juga harus dipertimbangkan. Sebelum mengaplikasikan beton geopolimer berbahan *fine coal* dan abu sekam padi secara luas, sangat dibutuhkan uji coba dan penelitian yang cerdas untuk memastikan bahwa beton geopolimer yang dihasilkan dapat memenuhi standar keamanan dan juga kualitas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan *fine coal* dan abu sekam padi terhadap sifat mekanik dan karakteristik beton geopolimer sebagai material ramah lingkungan. Hasilnya diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pemanfaatan limbah industri serta pengembangan bahan konstruksi alternatif.

2. Ringkas Teori

2.1. Beton Geopolimer

Beton merupakan salah satu jenis konstruksi yang paling banyak digunakan dalam dunia konstruksi. Beton geopolimer di definisikan sebagai beton baru yang 100% tidak menggunakan semen sebagai bahan pengikatnya, melainkan menggunakan material yang mengandung silika dan aluminium serta berbasis geopolimer seperti *fly ash* sebagai pengganti semen yang kemudian diaktivasi dengan alkali aktivator berupa NaOH dan Na₂SiO₃ dengan reaksi kimia polimerisasi antara bahan aluminosilikat dengan larutan alkali (Salain et al., 2021). Pasta geopolimer mengikat agregat kasar, agregat halus dan material lainnya yang menjadi bahan penyusun untuk pembuatan beton geopolimer (Setiawati et al., 2022). Berdasarkan penelitian terdahulu oleh (Gandina & Setiyarto, 2020), beton geopolimer memiliki beberapa kekurangan dan kelebihan. Kelebihannya antara lain: Tahan terhadap serangan asam sulfat, tahan terhadap reaksi kimia, tahan terhadap panas atau api, mempunyai susut yang kecil, dapat mengurangi polusi. Sedangkan kekurangannya adalah: Proses pembuatan yang sedikit lebih rumit dan memerlukan waktu yang relatif lebih panjang pada proses dibandingkan dengan beton konvensional, material yang digunakan lebih banyak dibandingkan dengan beton konvensional.

Kualitas beton yang baik dapat ditentukan oleh kualitas dari material yang digunakan, adapun material dasar pembentuk beton geopolimer diantaranya:

1) Agregat

Agregat adalah butiran alam sebagai bahan campuran beton yang berfungsi sebagai bahan pengisi yang mendominasi volume beton sekitar 70-75% dan memiliki peran penting dalam kekuatan dan kepadatan serta daya tahan beton. Agregat terbagi menjadi dua kelompok yaitu, agregat kasar dan agregat halus. Berdasarkan ASTM C-33/C33M-18 (2023) agregat halus adalah agregat dengan besar butir maksimum 4,75mm seperti pasir dan agregat kasar adalah agregat yang memiliki butiran lebih dari 4,75mm contohnya kerikil atau split.

2) Fly ash

Material buatan seperti *fly ash* atau abu terbang merupakan sisa-sisa pembakaran batubara seperti pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yang banyak digunakan sebagai bahan campuran pada beton atau *paving block*. *Fly ash* tidak memiliki kemampuan mengikat sendiri seperti halnya semen tetapi membutuhkan aktivator.

3) Alkali aktivator

Alkali Aktivator adalah salah satu bahan dasar dalam pembuatan beton geopolimer yang mengaktivasi *fine coal*, *fly ash*, abu sekam padi dan bahan binder lainnya dengan reaksi kimia polimerisasi, hal ini menjadikan alkali aktivator sebagai bahan yang sangat berkontribusi secara signifikan pada beton geopolimer. Umumnya, alkali

aktivator terdiri dari hidroksida logam alkali dan silikat logam alkali untuk aktivasi seperti NaOH atau *caustic soda* dan Na₂SiO₃ atau *natrium silicate* yang digunakan secara luas karena mudah ditemukan dan ekonomis.

Peningkatan ion Na dalam larutan mempercepat pelarutan mineral aluminosilikat yang ada dalam campuran karena ion natrium melekat dengan kuat dan menahan lapisan hidrasi molekul air (Amir Fauzi et al., 2024). Meningkatnya larutan alkali aktivator akan meningkatkan keberadaan silika terlarut dalam campuran, hal ini akan meningkatkan laju peleburan.

4) Air

Air sangat berperan penting pada komposisi beton, kandungan air yang berlebihan dapat menurunkan kualitas dari beton. Pada pembuatan beton geopolimer, air yang digunakan tidak terlalu banyak dibandingkan dengan beton pada umumnya, karena air dapat mempengaruhi reaksi polimerisasi yang terjadi pada beton dan juga menghambat proses *curing* atau perawatan.

2.2. Fine Coal

Proses penambangan batubara menghasilkan *fine coal*, yaitu serbuk batubara halus yang umumnya terbuang sebagai limbah karena belum dimanfaatkan. Meskipun dikategorikan sebagai sisa produksi, *fine coal* dalam jumlah besar masih mengandung kadar batubara yang bernilai ekonomis. Dengan melalui proses pengolahan lebih lanjut, limbah ini dapat diubah menjadi bahan yang berguna (Azis et al., 2022). Kegiatan produksi batubara terutama dalam pengolahan batubara, kegiatan pengolahan batubara akan menghasilkan hasil samping berupa batubara halus atau *fine coal*. Batubara halus atau *fine coal* merupakan produk samping dari sisa hasil peremukan batubara dengan *hammer crusher* yang telah melewati proses pengeringan dengan suhu 150°C-180°C menggunakan *rotary dryer*. *Fine coal* yang telah dikeringkan ditangkap dengan *multi clone* yang kemudian ditumpuk pada kolam penampungan sampai *fine coal* tersebut menjadi limbah, namun *fine coal* sendiri masih dapat digunakan dan bermanfaat karena memiliki nilai kalori yang terbilang tinggi jika dimanfaatkan sesuai peruntukannya.

2.3. Abu Sekam Padi

Padi merupakan kebutuhan pokok bagi penduduk negara-negara Asia, terutama Indonesia. Sekam padi adalah bagian kulit terluar atau cangkang yang keras hasil sampingan dari padi yang dihasilkan dari penggilingan padi yang kemudian menghasilkan beras dan juga sekam padi, yang dapat menjadi limbah dan menimbulkan pencemaran lingkungan jika diproduksi secara terus menerus tanpa dimanfaatkan. Abu sekam padi merupakan lapisan pelindung keras pada biji padi (*kariopsis*) yang terdiri dari dua bagian, yaitu lemma dan palea, yang saling terhubung. Selama proses penggilingan beras, sekam terlepas dari

butiran beras dan menjadi limbah hasil pengolahan. Sekam termasuk jenis biomassa yang memiliki banyak manfaat, seperti sebagai bahan baku industri, pakan ternak, serta sumber energi atau bahan bakar (Dewi et al., 2024). Sekam padi sendiri merupakan salah satu sumber penghasil silika terbesar karena proses pembakaran. Abu sekam padi yang dihasilkan dari proses pembakaran dengan suhu 400°C-500°C akan menghasilkan silika amorphous dan pada suhu 1000°C akan menghasilkan silika kristalin (Ridhayani et al., 2023). Abu silika ini yang kemudian dapat dimanfaatkan untuk berbagai proses kimia seperti proses polimerisasi pada beton geopolimer yang bereaksi dengan alkali aktivator.

3. Data dan Metodologi

3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Satuan Kerja Pabrik Briket Tanjung Enim yang berlokasi di daerah penambangan batubara Banko Barat, Tanjung Enim. Waktu pelaksanaan selama 8 minggu, terhitung mulai tanggal 02 Juni sampai dengan 25 Juli 2025.

3.2. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui metode studi literatur yang mencakup data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari hasil eksperimen dan wawancara, sedangkan data sekunder bersumber dari jurnal, buku, artikel, serta berbagai media lainnya. Selanjutnya, data yang terkumpul dianalisis melalui proses observasi dan digunakan dalam pembuatan sampel. Sampel tersebut kemudian diuji kuat tekannya pada umur 28 hari untuk menghasilkan data kuantitatif. Data berupa angka tersebut selanjutnya diolah dan dianalisis hingga diperoleh kesimpulan yang disajikan secara jelas sebagai suatu wawasan

4. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini dilakukan dengan menerapkan empat variasi komposisi dalam pembuatan beton geopolimer: A 30% ASP, 70% FC (7-10 ml air), B 70% ASP, 30% FC (7-10 ml air), C 0% ASP, 100% FC (7-10 ml air), D 0% ASP, 100% FC (25 ml air).

Keterangan:

ASP = Abu Sekam Padi

FC = Fine Coal

Setiap variasi komposisi sampel dibuat dalam dua ulangan sehingga total benda uji berjumlah 8 sampel. Benda uji dicetak menggunakan cetakan beton berbentuk kubus dengan dimensi panjang 5 cm, lebar 5 cm, dan tinggi 5 cm, sehingga memiliki volume 125 cm³. Material yang digunakan meliputi agregat halus dan agregat kasar berupa pasir serta kerikil, larutan alkali aktivator yang terdiri atas

natrium silikat dan caustic soda, serta bahan pengikat (binder) berupa fine coal dan abu sekam padi. Perbandingan masing-masing bahan adalah sebagai berikut:

Tabel 1 Persentase bahan

Perbandingan					
Agregat:Binder		NaOH:Na ₂ SiO ₃		Pasir:Kerikil	
A	B	A	B	A	B
68%	32%	30%	70%	32%	68%
100%		100%		100%	

Dengan menentukan dan menghitung persentase setiap Bahan pada Tabel 2 dengan volume cetakan yaitu 125 cm³, maka massa bahan yang digunakan pada setiap komposisi dengan formulasi bahan pada tabel 2 dan juga formulasi komposisi binder sampel A, B, C, dan D. Formulasi massa bahan yang sama tersebut akan menghasilkan sampel beton dengan spesifikasi yang sama namun dengan performa yang berbeda.

4.1. Pembuatan Sampel

Proses pembuatan sampel beton geopolimer dilakukan dengan 6 tahapan:

Pertama pengayakan: Abu sekam padi, agregat halus dan fine coal yang telah melewati berbagai proses, selanjutnya di ayak menggunakan ayakan 600 mesh atau 25 mikron (µm) dan 200 mesh atau 74 mikron (µm) yang dilengkapi dengan penutup dan pan, guna memisahkan partikel.

Pertama, massa Bahan dengan ukuran yang berbeda. Abu sekam padi di masukkan ke dalam ayakan 600 mesh atau 25 mikron (µm) kemudian digoyangkan dan diputar sampai partikel yang lebih halus memenuhi pan dan partikel yang berukuran lebih besar akan tertahan. Hal yang sama juga dilakukan pada fine coal dan juga agregat halus.

Kedua Pencampuran Bahan: Semua material penyusun berupa abu sekam padi dan *fine coal*, serta kerikil dan juga pasir ditimbang sesuai dengan variasi dan dicampurkan pada wadah, serta di aduk dengan spatula sampai campuran *homogen*. Alkali aktivator berupa *Caustic soda* dan *Natrium silikat* dituangkan pada gelas ukur.

Ketiga Pengadonan: Tahap pengadonan semua bahan yang telah dicampurkan sebelumnya berupa campuran bahan dan alkali aktivator dicampurkan kembali pada wadah plastik dan di aduk dengan menggunakan tangan. Aduk hingga adonan homogen, selagi diaduk tambahkan sedikit air suling 10-15 ml (25 ml untuk sampel D) ke dalam adonan dan aduk kembali.

Tabel. 2 Massa Bahan

Komposisi Sampel	Sampel A	Sample B	Sampel C dan D
Agregat(gram)	102	102	102
a. Pasir	33	33	33
b. Kerikil	69	69	69
Binder(gram)	48	48	48
a. ASP	14	34	0
b. FC	34	14	48
Alkali aktivator (gram)	29	29	29
a. NaOH	9	9	9
b. NaSiO ₃	20	20	20
Total Massa (gram)	179	179	179

Keempat Pencetakan: Adonan yang telah homogen selanjutnya dimasukkan ke dalam cetakan sampel beton yang telah diolesi dengan minyak, agar adonan tidak lengket pada cetakan. Adonan dimasukkan secara bertahap atau sepertiga cetakan, padatkan dengan memberi tekanan menggunakan kayu yang dipukul dengan palu sebanyak 35 ketukan, lakukan hal yang sama sampai cetakan terisi penuh.

Kelima Curing Oven: Cetakan yang telah berisi adonan dan telah dipadatkan selanjutnya di masukkan ke dalam oven selama 24 jam dengan suhu 60 derajat celsius. Setelah 24 jam, keluarkan cetakan dan dinginkan dengan suhu ruang sampai suhu turun.

Keenam Curing Kering: Setelah didinginkan dengan suhu ruang, selanjutnya sampel dikeluarkan dari cetakan dengan mengetuk sisi samping cetakan pada palu agar memudahkan proses, dan membuka mur juga baut pada cetakan. Setelah sampel terlepas dari cetakan, semua sisi dari sampel dilapisi dengan plastik wrap dan di letakkan pada tempat yang aman dan datar, diamkan selama 28 hari sampai pengujian kuat tekan dilakukan.



Gambar 1. Sampel beton (dok. pribadi)

4.2. Pengujian Benda Uji

Pengujian kuat tekan terhadap sampel uji beton geopolimer dilakukan sebanyak 2 (dua) kali berdasarkan

umur 28 hari, setelah melalui proses curing kering selama 28 hari, selanjutnya dilakukan pengujian guna mengetahui performa pada masing-masing komposisi sampel yang digunakan.

Pertama, Pengujian benda uji beton geopolimer: Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan sebuah beton untuk menerima gaya tekan per satuan luas. Satuan yang digunakan adalah f_c . f_c merupakan kuat tekan karakteristik beton yang diukur dalam satuan MPa atau N/mm^2 pada usia 28 hari (Mujahadah & Hariyadi, 2025).

Kedua, Peralatan yang digunakan: Peralatan yang digunakan pada proses uji kuat tekan beton adalah: *Digital compression machine*, Landasan beban, Jangka sorong, Neraca analitik.

Langkah kerja pengujian kuat tekan beton adalah sebagai berikut:

1. Ukur dan catat dimensi serta berat sampel dengan menggunakan jangka sorong dan neraca analitik
2. Letakkan landasan/plat besi pada alat uji sampai tersisa ruang untuk meletakkan benda uji
3. Letakkan sampel pada alat uji secara simetris dan pada permukaan yang rata
4. Atur indikator beban sampai menunjukkan angka nol
5. Atur kecepatan pembebanan dengan memutar tuas ke arah kiri.
6. Lakukan pembebanan sampai sampel mengalami keruntuhan dan catat beban maksimal yang diindikasikan oleh alat uji.



Gambar 2. Sampel setelah pengujian (dok. pribadi)

4.3. Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan

Setelah dilakukan pengujian terhadap benda uji dengan formulasi komposisi yang berbeda-beda menggunakan *digital compression machine*, didapatkan hasil pengujian terhadap sampel pada umur 28 hari. Rata-rata kuat tekan pada setiap sampel didapatkan dengan rumus berikut:

Dimana:

\bar{x} : rata-rata.

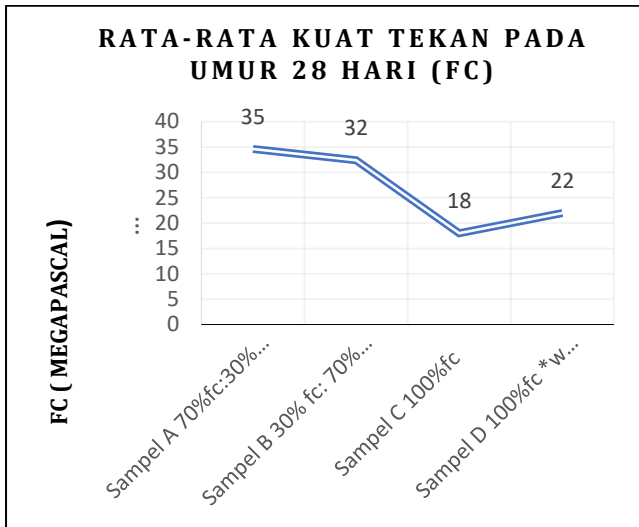
$$\bar{x} = \Sigma x / n$$

Σx : semua nilai data (hasil pengujian kuat tekan)

n : jumlah data dalam kumpulan (jumlah sampel)

4.4. Pengolahan Data Hasil Pengujian

Pengolahan data hasil pengujian dituangkan dalam bentuk grafik dan tabel dengan menggunakan acuan berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum. Pengujian dilakukan pada empat variasi sampel beton dengan perbedaan proporsi fine cement (fc), asphalt (asp), serta variasi volume air (W). Besarnya kuat tekan dipengaruhi oleh komposisi material, massa jenis, serta luas penampang benda uji, sebagaimana telah dilaporkan dalam berbagai penelitian lima tahun terakhir (Reddy et al., 2026)



Gambar 3. Rata-rata kuat tekan sampel

Gambar 3 menunjukkan perbandingan yang signifikan antara hasil pengujian kuat tekan keempat sampel, dengan rincian sebagai berikut:

a. Sampel 70% fc : 30% asp, W 7-10 ml

Sampel dengan luas penampang 2.587mm² dan massa 252g merupakan sampel A1 dan A2, di mana telah dilakukan pengujian dan ditemukan nilai kuat tekan pada sampel A1 adalah 24fc dan A2 adalah 45fc dengan nilai rata-rata sampel A adalah 35fc. Dominasi FC (70%) memberikan jumlah oksida aluminosilikat yang lebih cukup untuk proses geopolisasi.

Kuat tekan pada sampel ini merupakan hasil yang tertinggi dari keempat sampel, menunjukkan bahwa kuat tekan variasi beton ini dapat menahan beban yang lebih besar dibandingkan sampel lainnya. Dominasi FC (70%) memberikan jumlah oksida aluminosilikat yang lebih cukup untuk proses geopolisasi.

b. Sampel 30% fc:70% asp, W 7-10 ml

Sampel dengan luas penampang 2.581mm² dan massa 276g merupakan sampel B1 dan B2, dengan hasil kuat tekan sampel B1 adalah 48fc dan B2 adalah 17fc dengan nilai rata-rata B adalah 32fc.

c. Sampel 100%fc, W 7-10 ml

Sampel ini memiliki luas penampang 2.854mm² dengan massa 192g merupakan sampel C1 dan C2 dengan hasil kuat tekan C1 adalah 28fc dan C2 adalah 12fc, dengan nilai rata-rata kuat tekan adalah 18fc.

d. Sampel 100%fc W25 ml

Sampel D1 dan D2 memiliki luas penampang 2441mm² dan massa 247g, dengan hasil pengujian kuat tekan pada sampel D1 adalah 25fc dan D2 adalah 18fc dengan rata-rata dari kedua sampel adalah 22fc.

Tabel 3 Mutu beton dan kegunaannya pada konstruksi

Sampel	Jenis Beton	Fc' (Mpa)	Kegunaan pada konstruksi
A	Mutu sedang	35	Umumnya digunakan untuk beton bertulang seperti pelat lantai jembatan, gelagar beton bertulang, diafragma, kerb, beton pracetak gorong-gorong beton bertulang, bangunan bawah jembatan
B	Mutu sedang	32	Umumnya digunakan untuk beton bertulang seperti pelat lantai jembatan, gelagar beton bertulang, diafragma, kerb, beton pracetak gorong-gorong beton bertulang, bangunan bawah jembatan
C	Mutu rendah	18	Umumnya digunakan untuk struktur beton tanpa tulangan seperti beton siklop, trotoar, dan pasangan batu kosong yang diisi adukan, pasangan batu
D	Mutu sedang	22	Umumnya digunakan untuk beton bertulang seperti pelat lantai jembatan, gelagar beton bertulang, diafragma gorong-gorong beton bertulang, bangunan bawah jembatan

Berdasarkan pada tabel 3, menunjukkan bahwa sampel A, B, C, dan D memiliki mutu yang berbeda-beda. Berdasarkan acuan kementerian Pekerjaan Umum sampel A, B, dan D menjadi sampel dengan mutu sedang yang

memiliki kuat tekan pada rentang 20-<35fc yang dapat digunakan sebagai konstruksi pada jembatan, sedangkan sampel C merupakan sampel mutu rendah dengan rentang kuat tekan 15-<20fc yang masih dapat digunakan sebagai konstruksi trotoar.

Dari hasil pengujian, dan penentuan mutu serta perbandingan ini dapat diketahui bahwa sampel A dengan formulasi 70% *fine coal* dan 30% abu sekam padi dengan air 7-10 ml menunjukkan performa yang paling terbaik, dengan mutu sedang 35fc. Sampel A merupakan sampel yang paling tahan terhadap tekanan. Dengan demikian sampel tersebut cocok digunakan sebagai konstruksi pada jembatan yang mampu menahan tekanan yang besar. Kadar air rendah (7-10 ml) menjaga porositas tetap rendah. Dominasi FC (70%) memberikan jumlah oksida aluminosilikat yang lebih cukup untuk proses geopolisasi, ASP 30% berperan sebagai sumber silika reaktif yang mempercepat pembentukan gel N-A-S-H atau C-A-S-H, sehingga struktur lebih padat. Komposisi campuran ASP-FC yang seimbang namun tetap didominasi FC menghasilkan struktur geopolimer paling kuat.

Sama halnya dengan sampel A, sampel B dengan formulasi 30% *fine coal* dan 70% abu sekam padi serta penambahan air 7-10 ml. Meskipun ASP tinggi (70%), performa lebih rendah dari sampel A. Variasi hasil yang ekstrem (48 fc vs 17 fc) menunjukkan ketidakstabilan struktur, kemungkinan akibat distribusi air dan aktivator yang tidak homogen pada komposisi ASP tinggi. ASP memang kaya silika, namun kandungan alumina dan mineral pengikatnya jauh lebih rendah dibanding FC—mengakibatkan reaksi geopolisasi tidak optimal. Kandungan ASP yang terlalu besar mengurangi performa struktur, meskipun masih cukup baik dibanding sampel C dan D. Penelitian oleh (Vo et al., 2023) mengkaji pengaruh penggunaan abu sekam padi (rice husk ash / RHA) dan serat hibrida terhadap sifat rekayasa densified high-performance fiber-reinforced concrete (DHPFRC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan RHA dapat meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton karena kandungan silika reaktifnya yang tinggi, sehingga memperbaiki kekuatan tekan dan durabilitas material. Selain itu, kombinasi serat hibrida berkontribusi dalam meningkatkan sifat mekanik seperti ketahanan retak dan daktilitas.

Sampel C menjadi sampel dengan mutu yang paling rendah dengan formulasi 100% *fine coal* dengan penambahan air 7-10 ml, namun masih dapat digunakan sesuai dengan peruntukannya seperti sebagai konstruksi trotoar. Ketiadaan ASP menyebabkan reaksi geopolisasi hanya bergantung pada mineral FC, yang memiliki silika reaktif lebih sedikit. Massa sampel yang lebih ringan menunjukkan porositas tinggi, menurunkan daya tekan. Air minimal (7-10 ml) tidak memadai untuk proses larut-hancur (dissolution) FC dalam reaksi alkali-aktivasi.

Penelitian sebelumnya juga melaporkan bahwa FC sebagai satu-satunya binder menunjukkan performa rendah tanpa bahan pozzolan tambahan (Ansari & Kumar, 2025; Mishra et al., 2022)

Sampel D dengan formulasi 100% *fine coal* dengan penambahan air 25 ml memiliki performa yang baik dengan mutu sedang yang cocok digunakan untuk peruntukan konstruksi jembatan, kedua sampel ini berada ditengah-tengah segi kekuatan tekan dari keempat sampel. Berbeda dengan sampel lainnya yang memiliki mutu sedang

Air menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi kuat tekan keempat sampel, sampel D yang memiliki formulasi 100% *fine coal* dengan tambahan air 25 ml lebih baik dibandingkan dengan sampel C dengan penambahan air 7-10 ml karena sifat *fine coal* yang menyerap air, walaupun pada umumnya batubara tidak larut dalam air, perbedaan ini disebabkan karena *fine coal* telah menjadi partikel halus. Penambahan abu sekam padi pada binder beton geopolimer juga menjadi faktor yang mempengaruhi nilai kuat tekan karena abu sekam padi yang mengandung banyak silika dapat meningkatkan kuat tekan beton seperti pada sampel A dan B. Sampel A dengan penggunaan abu sekam padi 30% menjadi sampel dengan kuat tekan yang paling unggul. Penggunaan abu sekam padi dapat disesuaikan dengan aplikasi yang akan dilakukan. Secara keseluruhan, pemilihan formulasi beton geopolimer dapat disesuaikan dengan kebutuhan yang spesifik dari kegunaannya. Apakah membutuhkan kekuatan tekan yang tinggi, atau kekuatan yang standar.

5. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa fine coal (FC) dan abu sekam padi (ASP) dapat dimanfaatkan secara efektif sebagai material prekursor alternatif dalam beton geopolimer berbasis aktivasi alkali. Hasil penelitian menegaskan bahwa komposisi campuran dan kadar air merupakan parameter kunci yang menentukan kuat tekan. Kombinasi optimum diperoleh pada komposisi 70% FC dan 30% ASP dengan kuat tekan sebesar 35 MPa, yang termasuk dalam kategori beton mutu sedang dan berpotensi diaplikasikan pada elemen konstruksi seperti komponen jembatan. Sebaliknya, sistem berbasis FC murni menunjukkan performa yang lebih rendah, sehingga menegaskan pentingnya penambahan sumber silika reaktif seperti ASP untuk meningkatkan proses geopolisasi. Selain itu, variasi kadar air terbukti berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik, sehingga memerlukan optimasi yang cermat untuk menyeimbangkan workability dan porositas. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa beton geopolimer berbasis FC-ASP merupakan alternatif material konstruksi yang berkelanjutan, dengan potensi mengurangi limbah industri dan emisi karbon

tanpa mengorbankan kinerja mekanik yang dibutuhkan dalam aplikasi praktis.

Penelitian ini masih terbatas pada pengujian kuat tekan pada umur 28 hari dan belum mengevaluasi sifat durabilitas serta karakteristik mikrostruktur material. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu difokuskan pada analisis mikrostruktur (SEM, XRD, FTIR), pengujian ketahanan terhadap lingkungan agresif, serta optimasi komposisi aktivator alkali. Selain itu, studi skala pilot dan analisis keekonomian juga diperlukan untuk menilai kelayakan implementasi material ini secara industri.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Pabrik Briket atas dukungan berupa fasilitas dan sumber daya yang diperlukan dalam penelitian ini.

7. Refrensi

- Amir Fauzi, S. T., Edi Majuar, S. T., Ir Jufriadi, M. T., Syukri, S. T., Ir Aulia Rachman, S. T., & MT, I. P. P. (2024). *GEOPOLIMER SEBAGAI ALTERNATIF SEMEN PADA MASA DATANG*. Penerbit Andi.
- Ansari, G. A., & Kumar, S. S. (2025). Geopolymerization of fly ash and GGBS for sustainable industrial waste utilization. *Scientific Reports*, *15*(1), 34318.
- Athira, V. S., Charitha, V., Athira, G., & Bahurudeen, A. (2021). Agro-waste ash based alkali-activated binder: Cleaner production of zero cement concrete for construction. *Journal of Cleaner Production*, *286*, 125429.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125429>
- Azis, I. I., Syaiful, A. Z., & Gazali, A. (2022). Penentuan waktu optimum pengolahan fine coal dengan metode molenisasi. *Jurnal Saintis*, *3*(1), 27–34.
- Chandra, D. (2019). Analisa Pengaruh Aktivator Kalium Dan Kondisi Material Pada Beton Geopolymer Dari Limbah B3 Fly Ash Batubara Terhadap Kuat Tekan. *JURNAL REKAYASA*, *9*(2), 73–90.
- Chandra, D. (2021). ANALISA PENGARUH AKTIVATOR KALIUM DAN KONDISI MATERIAL PADA BETON GEOPOLYMER DARI LIMBAH B3 FLY ASH BATUBARA TERHADAP KUAT TEKAN. *Jurnal Rekayasa*, *11*(1), 1–16.
- Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *8*(3), 283–314.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- Dewi, S. U., Afni, D. N., & Renaldi, S. (2024). Pengaruh penggunaan abu sekam padi terhadap kuat tekan beton K-175. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, *9*(2), 260–271.
- Gandina, N. L., & Setiyarto, Y. D. (2020). Studi Eksperimental Beton Geopolimer dengan Memanfaatkan Fly Ash Sebagai Pengganti Semen dan Serat MAT Sebagai Aditif. *CRANE: Civil Engineering Research Journal*, *1*(1).
<https://doi.org/https://doi.org/10.34010/crane.v1i1.4181>
- Luhar, I., & Luhar, S. (2022). A comprehensive review on fly ash-based geopolymer. *Journal of Composites Science*, *6*(8), 219.
- Mishra, J., Nanda, B., Patro, S. K., & Krishna, R. S. (2022). Sustainable fly ash based geopolymer binders: a review on compressive strength and microstructure properties. *Sustainability*, *14*(22), 15062.
- Mujahadah, N., & Hariyadi, H. (2025). PENGUJIAN KUAT TARIK BELAH BETON KUBUS TERHADAP VARIASI KUAT TEKAN BETON DENGAN METODE BRITISH STANDARD PART 117. *Media Bina Ilmiah*, *19*(8), 5297–5306.
- Naufal, M., Sariman, S., & Yuniarto, E. (2024). Efektivitas Aktivator Alkali Potassium Hidroksida Dan Abu Sekam Padi Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi*, *2*(2), 153–158.
- Oktaviastuti, B., Damar Pandulu, G., & Lusyana, E. (2021). Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash) Sebagai Alternatif Perkerasan Kaku di Daerah Pesisir (Compressive Strength of Geopolymer Concrete Based on Fly Ash as an Alternative to Rigid Pavement in Coastal Areas). *6*(1), 78–87.
<https://doi.org/10.33366/rekabuana.v6i1.2271>
- Özkılıç, Y. O., Celik, A. I., Tunc, U., Karalar, M., Deifalla, A., Alomayri, T., & Althoey, F. (2023). The use of crushed recycled glass for alkali activated fly ash based geopolymer concrete and prediction of its capacity. *Journal of Materials Research and Technology*, *24*, 8267–8281.
- Rangan, P. R. (2020). *KARAKTERISTIK GEOPOLIMER YANG MENGGUNAKAN ABU JERAMI, ABU TERBANG DAN TANAH LATERIT SEBAGAI BAHAN RAMAH LINGKUNGAN*. Universitas Hasanuddin.
- Reddy, N. G., Karikatti, V. B., Pratap, B., Patil, S. V., & Zalar Serjun, V. (2026). Strength and cost analysis of geopolymer concrete using rice husk ash and GGBS as sustainable cement alternatives. *Scientific Reports*.
- Ren, B., Zhao, Y., Bai, H., Kang, S., Zhang, T., & Song, S. (2021). Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review. *Chemosphere*, *267*, 128900.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosp here.2020.128900>

- Ridhayani, I., Dasar, A., Mahmuda, A. F., Manaf, A., & Patah, D. (2023). Perbandingan kinerja bata beton menggunakan abu cangkang sawit, abu sekam padi dan abu serat sagu. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 11(2), 241–248.
- Salain, I., Wiryasa, M. N. A., & Pamungkas, I. (2021). Kuat Tekan Beton Geopolimer Menggunakan Abu Terbang. *Jurnal Spektran*, 9(1), 76–84.
<https://doi.org/https://doi.org/10.24843/SPEKTRA N.2021.v09.i01.p09>
- Setiawati, M., Martini, S., & Nurulita, R. (2022). Variasi molaritas NaOH dan alkali aktivator beton geopolimer. *Jurnal Deformasi*, 7(1), 56–64.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31851/deformasi.v7i1.7983>
- Vo, D.-H., Nguyen, M.-H., Nguyen, M. H., Hwang, C.-L., & Huynh, T.-P. (2023). Influence of rice husk ash and hybrid fiber on engineering properties of densified high-performance fiber-reinforced concrete. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 237(11), 2445–2457.