



INOVASI BETON GEOPOLIMER BERBASIS LIMBAH FLY ASH DAN SABUT KELAPA

Wiku Adhiwicaksana Krasna^a, Nursiah Chairunnisa^b, Ratni Nurwidayati^c, Ade Yuniati Pratiwi^d, Arya Rizki Darmawan^e, Ahmad Ridha^f, Hamid Nur Mukhlis^g

^{a-g}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat

Email korespondensi: wakrasna@ulm.ac.id

ABSTRAK

Pemerintah Indonesia tengah mempercepat pembangunan infrastruktur guna meningkatkan daya saing global. Dalam proses ini, beton menjadi material utama karena kekuatan tekan yang tinggi, fleksibilitas bentuk, serta biaya yang relatif murah. Peningkatan penggunaan beton berdampak pada lonjakan produksi semen, yang menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) dan berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan.

Sebagai solusi, beton geopolimer dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan dengan menggunakan bahan pengikat berbasis alumina-silikat. Material ini memanfaatkan limbah industri seperti abu terbang (fly ash), yang kaya akan silika dan alumina. Kalimantan Selatan, dengan keberadaan PLTU Asam-Asam, menghasilkan sekitar 160 ton fly ash per hari yang berpotensi digunakan dalam pembuatan beton geopolimer. Selain fly ash, pemanfaatan serat alami seperti serabut kelapa juga menjadi inovasi dalam peningkatan performa beton. Indonesia memiliki luas lahan kelapa yang signifikan, namun limbah serabutnya belum dimanfaatkan secara optimal. Serabut kelapa memiliki kuat tarik yang baik dan dapat meningkatkan kekuatan beton ketika mengalami perlakuan alkalisasi.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang campuran beton geopolimer berbahan dasar fly ash dari PLTU Asam-Asam dengan tambahan serabut kelapa yang telah mengalami alkalisasi. Pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah dilakukan untuk mengevaluasi dampak variasi persentase serat kelapa terhadap performa beton geopolimer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serat kelapa sebesar 0,2% dapat memberikan kekuatan tekan optimal pada mortar geopolimer, dan penambahan sebesar 0,5% menunjukkan peningkatan kuat tarik belah yang sangat signifikan. Riset ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap inovasi material konstruksi yang lebih berkelanjutan.

Kata kunci: Infrastruktur berkelanjutan, Beton geopolymer, Fly ash (abu terbang), Serabut kelapa.

PENDAHULUAN

Industri konstruksi yang semakin menekankan pada keberlanjutan telah mendorong penelitian menuju alternatif ramah lingkungan untuk semen Portland konvensional. Mortar geopolimer, yang memanfaatkan bahan limbah industri yang kaya silika dan alumina seperti fly ash, menawarkan solusi menjanjikan untuk mengurangi dampak lingkungan sambil mempertahankan kinerja struktural (Kandoria et al., 2022). Penggunaan serabut kelapa dalam campuran beton geopolimer dapat meningkatkan kekuatan tarik dan memperbaiki workability, sehingga menjadikannya pilihan yang menarik untuk konstruksi berkelanjutan.



Serat kelapa, produk limbah pertanian yang tersedia secara luas, memiliki sifat mekanik yang menguntungkan termasuk kekuatan tarik yang baik dan ketahanan terhadap mikroorganisme (Bui et al., 2020). Namun, sifat hidrofilik dan ikatan antarmuka yang lemah antara serat alami dan matriks semen sering membatasi efektivitasnya. Perawatan alkalisasi telah muncul sebagai metode yang efektif untuk meningkatkan adhesi matriks serat dengan memodifikasi karakteristik permukaan serat dan menghilangkan komponen lignin dan hemiselulosa (Li et al., 2021).

Selain manfaat memanfaatkan fly ash dan sabut kelapa, eksplorasi produk sampingan industri lainnya sebagai bahan pelengkap dalam beton geopolimer dapat semakin meningkatkan keberlanjutannya. Misalnya, penggabungan abu sekam padi, yang kaya akan silika dan diproduksi dalam jumlah besar sebagai limbah pertanian, dapat meningkatkan sifat mekanik beton sementara juga mengatasi masalah pengelolaan limbah di sektor pertanian. Penelitian menunjukkan bahwa pencampuran abu sekam padi dengan abu terbang dapat menyebabkan efek sinergis, menghasilkan peningkatan kekuatan tekan dan daya tahan beton geopolimer (Olii et al., 2025). Selain itu, karena industri konstruksi semakin berusaha mengurangi jejak karbonnya, adopsi bahan inovatif semacam itu tidak hanya berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan tetapi juga mendorong pertumbuhan ekonomi dengan menciptakan pasar baru untuk bahan limbah (Henry & Kato, 2009).

Selain itu, penggunaan fly ash sebagai pengganti sebagian semen Portland tidak hanya mengurangi emisi karbon yang terkait dengan produksi semen tetapi juga meningkatkan keberlanjutan beton secara keseluruhan, sebagaimana dibuktikan oleh penelitian yang menunjukkan peningkatan kinerja mekanik ketika fly ash digunakan bersama dengan serat alami (Ali Maksum & Novarro Batubara, 2024).

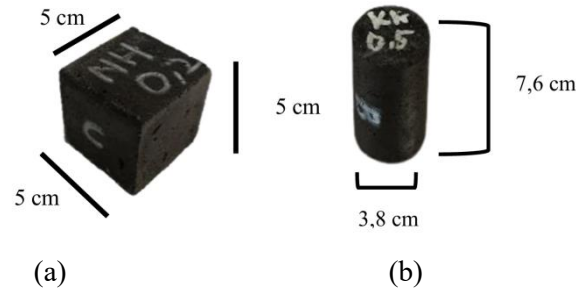
Metodologi komprehensif ini untuk pengadaan bahan memiliki potensi untuk secara fundamental mengubah standar metodologi konstruksi berkelanjutan di Indonesia dan daerah lainnya. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih dalam mengenai potensi penggunaan limbah industri dalam pengembangan material konstruksi yang ramah lingkungan.

METODE PENELITIAN

Pembuatan Benda Uji

Mortar geopolimer dibuat menggunakan fly ash sebagai pengikat utama, diaktifkan dengan larutan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3). Serat kelapa bersumber secara lokal dan diproses untuk perawatan alkalisasi. Larutan alkali digunakan untuk proses alkalisasi serat kelapa adalah larutan NaOH. Mortar geopolimer yang diformulasikan dalam penelitian ini menggabungkan berbagai persentase serat kelapa, yaitu 0%, 0,2%, dan 0,5%. Tingkat kandungan serat yang berbeda ini dievaluasi untuk menilai dampaknya pada karakteristik kinerja beton geopolimer. Benda uji dibuat dalam bentuk kubus mortar geopolimer berukuran 5x5x5cm untuk pengujian tekan dan silinder mortar geopolimer berdiameter 3.8cm dengan tinggi 7.6cm untuk pengujian kuat belah seperti yang ditunjukkan dalam

Gambar 1. Nomenklatur kode benda uji yang digunakan adalah GK untuk mortar geopolimer kubus dan GS untuk mortar geopolimer silinder yang diikuti dengan persentase penggunaan serat kelapa.



Gambar 1 Benda uji mortar geopolimer (a) Kubus, (b) Silinder

Metode Pangujian

1. Uji Kekuatan Tekan

Standar pengujian menentukan kekuatan tekan beton dan mortar adalah ASTM C39/C39M (ASTM C39/C39M, 2024). Standar ini memberikan garis besar prosedur yang diperlukan untuk menyiapkan dan menguji spesimen beton atau mortar. Tujuan dari standar ini adalah untuk secara akurat mengukur kekuatan tekan material. Untuk memulai proses pengujian, penting untuk menyiapkan sampel dengan benar. Ini melibatkan pencampuran dan pembentukan mortar atau beton ke dalam bentuk dan ukuran spesimen yang ditentukan. Setelah persiapan sampel, spesimen harus menjalani proses pengawetan dalam kondisi terkendali. Langkah ini sangat penting, karena pengawetan yang tepat diperlukan untuk mencapai kekuatan optimal, memastikan bahwa bahan mencapai potensi penuhnya sebelum pengujian. Setelah spesimen disembuhkan secara memadai, prosedur pengujian dapat dimulai. Spesimen ditempatkan dalam mesin uji kompresi, di mana beban diterapkan secara bertahap sampai kegagalan terjadi. Penting untuk memantau penerapan beban dengan cermat untuk memastikan hasil yang akurat. Setelah kegagalan spesimen, beban maksimum di mana kegagalan terjadi dicatat. Kekuatan tekan kemudian dihitung dengan membagi beban maksimum ini dengan luas penampang spesimen. Dengan mengikuti pedoman yang ditetapkan dalam ASTM C39/C39M, pengujian untuk kekuatan tekan dilakukan dengan cara standar. Pendekatan ini tidak hanya memastikan keandalan hasil tetapi juga memungkinkan untuk perbandingan di berbagai pengujian, menjadikannya standar penting di bidang pengujian beton dan mortar. Perhitungan kuat tekan mengikuti Persamaan (1), dimana f'_m adalah kuat tekan mortar (N/m), P adalah beban maksimum (N), A adalah luas penampang yang menerima beban (mm^2).

$$f'_m = P/A \quad (1)$$

2. Uji Kekuatan Tarik Belah

Untuk mengukur kekuatan tarik belah sampel beton, menggunakan ASTM C496/C496M (ASTM C496/C496M, 2017). Standar ini menguraikan prosedur untuk menguji kekuatan tarik pemisahan



spesimen beton silinder. Dalam pengujian ini, silinder beton ditempatkan secara horizontal di antara pelat pemuatan mesin uji. Beban diterapkan secara diametris sampai sampel gagal. Beban maksimum pada kegagalan dicatat, dan kekuatan tarik pemisahan dihitung menggunakan rumus yang sesuai yang disediakan dalam standar. Metode ini memastikan hasil yang konsisten dan andal, memberikan wawasan berharga tentang sifat tarik dan daya tahan beton yang diuji. Persamaan (2) digunakan untuk melakukan perhitungan kuat tarik belah, dimana F_{ct} adalah kuat tarik belah (Mpa), D merupakan diameter benda uji silinder (mm), dan L adalah panjang benda uji (mm)

$$F_{ct} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (2)$$

3. Pengujian sifat fisik

ASTM C642 (ASTM C642, 2021) digunakan untuk menguji kepadatan, penyerapan, dan porositas beton yang diperkeras. Proses ini melibatkan pengeringan, penimbangan, perendaman, serta pengukuran volume sampel beton untuk menghitung porositas. Hasil pengujian memberikan gambaran tentang kemampuan beton menahan penetrasi air, yang berhubungan langsung dengan daya tahannya terhadap faktor lingkungan seperti siklus beku-cair dan potensi kerusakan akibat kelembaban.

Sementara itu, ASTM C1585 (ASTM C1585, 2020) digunakan untuk mengevaluasi sorptivitas, yaitu kemampuan beton menyerap air melalui aksi kapiler. Uji ini mengukur laju dan jumlah air yang diserap dalam periode tertentu, sehingga dapat memperkirakan ketahanan beton terhadap korosi tulangan, retak, atau kerusakan jangka panjang. Kedua standar ini saling melengkapi dalam menilai kinerja beton, membantu memastikan struktur dapat bertahan dalam kondisi lingkungan yang lembab dan menuntut kedekatan yang tinggi.

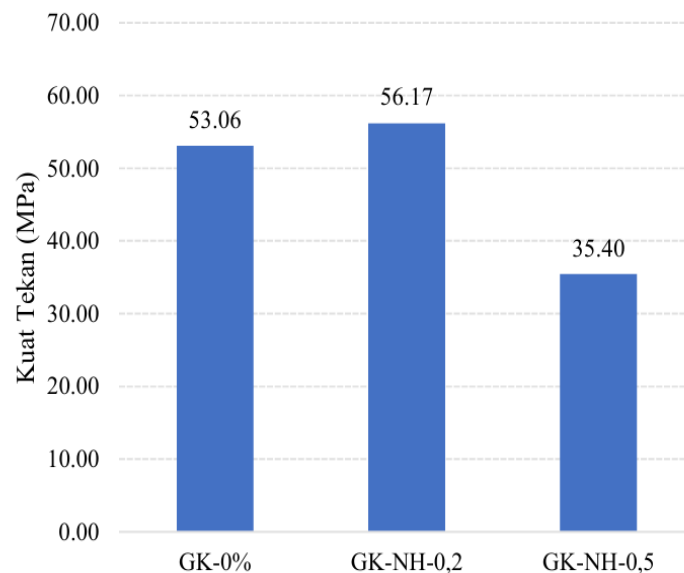
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat mekanik

1. Kuat Tekan

Hasil kekuatan tekan mengungkapkan variasi yang signifikan berdasarkan persentase serat dan perlakuan alkalisasi. Kekuatan tekan tertinggi 56,17 MPa dicapai dengan kandungan serat kelapa 0,2%. Penambahan serat 0,2% umumnya meningkatkan kekuatan tekan di semua perlakuan alkalisasi, karena serat berfungsi sebagai pengikat retak mikro (*crack bridging*) yang memperkuat ikatan antara matriks semen dan serat. Sedangkan kandungan serat 0,5% menyebabkan penurunan kekuatan karena potensi aglomerasi serat dan peningkatan porositas, sehingga distribusinya tidak merata dalam matriks beton.

Kondisi tersebut justru menciptakan titik lemah dan rongga (porositas yang meningkat), yang pada akhirnya menurunkan kekuatan tekan. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa ada kadar optimum serat (0,2%) yang mampu meningkatkan kekuatan tekan, sementara kelebihan jumlah serat justru berakibat negatif karena masalah aglomerasi dan porositas. Korelasi ini sesuai dengan teori *fiber reinforced concrete* yang menekankan pentingnya keseimbangan antara jumlah serat, ikatan matriks, dan workability untuk memperoleh kekuatan mekanik yang maksimal. Hasil ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan (Susilowati et al., 2016) bahwa nilai kuat tekan optimum terjadi pada persentase serabut kelapa 0,2% dibandingkan persentase 0%, 0,4%, dan 0,6%. Perbandingan nilai kekuatan tekan pada variasi serat 0, 0.2, dan 0.5% dengan alkalisasi larutan NaOH ditunjukkan pada Gambar 2.

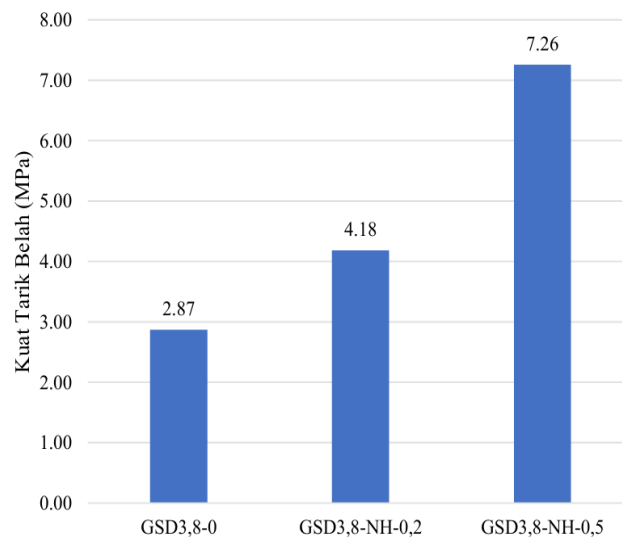


Gambar 2 Perbandingan Kuat Tekan dengan Persentase Kelapa 0,2% dan 0,5% pada Alkalisasi NaOH

2. Kuat Tarik Belah

Berlawanan dengan tren kekuatan tekan, kekuatan tarik split menunjukkan kinerja optimal pada kandungan serat 0,5%, mencapai 7,26 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan serat yang lebih tinggi bermanfaat untuk aplikasi tarik, di mana mekanisme penjembatanan retak serat memainkan peran yang lebih dominan daripada dalam skenario pemuatan tekan. Perbedaan tren antara kuat tekan dan kuat tarik belah terjadi karena mekanisme kerja serat dalam beton berbeda pada masing-masing jenis pembebanan. Pada kuat tekan, beton terutama bergantung pada matriks semen dan agregat untuk menahan beban, sehingga penambahan serat dalam jumlah besar sering menurunkan performa akibat aglomerasi, porositas, dan gangguan workability yang melemahkan struktur. Sebaliknya, pada kuat tarik belah, beton yang pada dasarnya lemah terhadap tarik sangat terbantu oleh keberadaan serat, karena

serat berfungsi sebagai penjemabatan retak (*crack bridging*) dan media transfer tegangan setelah retak awal terbentuk. Meskipun pada kadar serat yang tinggi mengakibatkan distribusi serat cenderung kurang merata karena adanya aglomerasi, pada pengujian tarik justru jumlah serat yang lebih banyak dapat meningkatkan kinerja. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya peluang serat untuk melintasi bidang retak sehingga mekanisme penjemabatan retak (*crack bridging*) dan transfer tegangan dapat bekerja lebih efektif. Dengan demikian, meskipun homogenitas campuran sedikit berkurang, keberadaan serat dalam jumlah yang lebih tinggi tetap memberikan kontribusi signifikan dalam memperlambat perambatan retak dan meningkatkan *post-cracking behavior*. Kondisi ini menjelaskan mengapa pada kadar serat 0,5% kuat tarik belah mencapai nilai optimum. Hasil ini juga sejalan dengan penelitian (Edison, 1990) semakin banyak persentase serat yang ditambahkan maka semakin tinggi juga kuat tarik belah pada beton. Namun peningkatan kadar serat secara berlebihan tidak selalu menghasilkan tren serupa. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan volume optimum serat dalam beton, di mana kadar yang terlalu tinggi justru menurunkan *workability*, memicu aglomerasi, dan memperbesar porositas. Akibatnya, distribusi serat menjadi semakin tidak merata dan ikatan dengan matriks semen melemah, sehingga efisiensi mekanisme *crack bridging* berkurang. Tren ini sesuai dengan penelitian-penelitian yang telah dilakukan yang menegaskan bahwa serat memiliki kontribusi terbatas pada kekuatan tekan, tetapi dominan pada peningkatan kekuatan tarik, lentur, dan ketangguhan beton (Fallah & Nematzadeh, 2017; Susilowati et al., 2016.). Perbandingan nilai kekuatan tarik belah pada variasi serat 0, 0.2, dan 0.5% dengan alkalisasi larutan NaOH ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Perbandingan Kuat Tarik Belah dengan Persentase Kelapa 0,2% dan 0,5% pada Alkalisasi NaOH

Sifat Fisik

1. Absorpsi dan Porositas



Spesimen dengan kandungan serat 0,2% menunjukkan nilai penyerapan dan porositas terendah, menunjukkan struktur material yang lebih padat. Ini berkorelasi baik dengan kekuatan tekan dan lentur yang lebih tinggi yang diamati. Pada kandungan serat 0,5%, penyerapan dan porositas meningkat, menunjukkan bahwa serat yang berlebihan menciptakan rongga di dalam matriks, berpotensi membahayakan kepadatan dan kekuatan material.

2. Sorptivity

Pengujian sorptivitas mengungkapkan bahwa sampel dengan kandungan serat sebesar 0,2% menunjukkan tingkat sorptivitas paling rendah, yang mengindikasikan kemampuan luar biasa dalam menahan masuknya air lewat mekanisme kapilaritas. Peningkatan sifat ketahanan seperti ini memiliki peran vital bagi kelangsungan performa material dalam jangka waktu yang panjang pada penggunaan di bidang konstruksi.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan potensi serat kelapa alkali sebagai aditif yang efektif dalam mortar geopolimer. Temuan utama meliputi:

1. Persentase serat optimal bervariasi menurut properti: 0,2% kandungan serat kelapa optimal untuk tekan (56,17 MPa), sedangkan 0,5% lebih disukai untuk kekuatan tarik terbelah (7,26 MPa) .
2. Korelasi sifat fisik-mekanik: Nilai penyerapan, porositas, dan sorptivitas yang lebih rendah berkorelasi dengan peningkatan kekuatan tekan, terutama pada kandungan serat 0,2% dengan alkalisasi NaOH.
3. Potensi konstruksi berkelanjutan: Keberhasilan pemanfaatan limbah serat kelapa dalam mortar geopolimer berkontribusi pada praktik konstruksi berkelanjutan sambil mencapai sifat material yang ditingkatkan

DAFTAR PUSTAKA

- Ali Maksum, H., & Novarro Batubara, B. (2024). *Penambahan Serat Polypropylene Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Campuran Beton Geopolimer* (Vol. 5, Issue 1).
- ASTM C39/C39M. (2024). *Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-24
- ASTM C496/C496M. (2017). *Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17
- ASTM C642. (2021). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0642-21>
- ASTM C1585. (2020). *Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C1585-20>



- Bui, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., & Levacher, D. (2020). *Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coconut fibers for their recycling in construction materials* *Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coconut fibers for their recycling in construction materials* *Determination and Review of Physical and Mechanical Properties of Raw and Treated Coconut Fibers for Their Recycling in Construction Materials*. 8, 37. <https://doi.org/10.3390/fib8060037>
- Fallah, S., & Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, 132, 170–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100>
- Henry, M., & Kato, Y. (2009). The role of new material technologies for sustainable practice in the concrete industry. *PICMET: Portland International Center for Management of Engineering and Technology, Proceedings*, 1738–1744. <https://doi.org/10.1109/PICMET.2009.5261972>
- Kandoria, V. S., Kaur, L., & Sharma, Dr. S. (2022). Development of Geopolymer Mortar Using Fly Ash. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(3), 2375–2377. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41139>
- Li, Q., Ibrahim, L., Zhou, W., Zhang, M., & Yuan, Z. (2021). Treatment methods for plant fibers for use as reinforcement in cement-based materials. In *Cellulose* (Vol. 28, Issue 9, pp. 5257–5268). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03903-w>
- Olii, M. R., Mangewa, N., Abdul Djau, R., Nento, S., & Zailani Olii, A. K. (2025). Optimalisasi Kuat Tekan Beton Geopolimer Menggunakan Fly Ash dan Abu Sekam Padi. *JURNAL TEKNIK SIPIL CENDEKIA (JTSC)*, 6(2), 1454–1468. <https://doi.org/10.51988/jtsc.v6i2.286>
- Susilowati, A., Simanullang, K. A., Aprilia, L., Teknik, J., Politeknik, S., Jakarta, N., Prof, J., & Siwabessy, G. A. (2016). *Bata Beton (Paving Block) Geopolimer Dengan Variasi Konsentrasi Serat Sabut Kelapa*.