Hulonthalo Journal of Civil and Architecture (HJCA)
Vol. 1, No. 1, Juni 2025, pp. 1-6
ISSN: 2302-9285, DOI: 10.11591/hjca.v1i1.1032

Analisis Struktural dan Keberlanjutan Material Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang Kelas F Aktivator Alkali sebagai Alternatif pada Struktur Gedung Bertingkat

Abdi Irawan Kuku[1], Trisyawati Sahi[2]
[1,2]Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Gorontalo, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Februari 23, 2025
Revised Mei 19, 2025
Accepted Juni 29, 2025

Keywords:

Beton Geopolimer
Abu Terbang
Struktural
Analisis Siklus Hidup
Gedung Bertingkat

ABSTRACT

Penelitian ini mengevaluasi potensi beton geopolimer berbasis abu terbang (fly ash) kelas F sebagai alternatif berkelanjutan pengganti beton Portland (OPC) pada struktur gedung bertingkat menengah. Melalui pendekatan eksperimental dan analisis siklus hidup (LCA), penelitian mengkaji pengaruh variasi konsentrasi aktivator alkali dan suhu curing terhadap kinerja material, perilaku elemen struktur (balok dan kolom), serta durabilitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proporsi optimal (rasio aktivator 2.0, NaOH 12M, curing 80°C) menghasilkan kuat tekan 48,7 MPa. Elemen struktur beton geopolimer menunjukkan perilaku lentur dan aksial yang sebanding dengan OPC, meski modulus elastisitasnya 20% lebih rendah. Keunggulan signifikan terlihat pada durabilitas, dengan ketahanan superior terhadap serangan sulfat dan klorida. Analisis LCA mengungkap bahwa beton geopolimer dapat mengurangi emisi karbon sebesar 43,4% dan konsumsi energi primer 25% dalam tahap cradle-to-gate. Disimpulkan bahwa beton geopolimer berbasis fly ash lokal merupakan material yang layak dan berkelanjutan untuk aplikasi struktural. Implementasinya dapat berkontribusi besar pada pembangunan hijau di Indonesia, dengan keunggulan durabilitas di lingkungan agresif. Penelitian merekomendasikan pengembangan pedoman teknis, strategi mitigasi susut, dan optimasi biaya melalui pemanfaatan aktivator berbahan limbah untuk mendorong adopsi yang lebih luas.

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Corresponding Author:

Abdi Irawan Kuku
Teknik Sipil
Universitas Muhammadiyah Gorontalo
Jln. Prof. Mansoer Pateda Kec. Telaga Biru Kab. Gorontalo
Email: aikuku@umgo.ac.id

1. INTRODUCTION

Industri konstruksi global, termasuk di Indonesia, menghadapi paradoks yang semakin nyata. Di satu sisi, pembangunan infrastruktur dan gedung bertingkat menengah merupakan kebutuhan mendesak untuk menopang pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi. Data Badan Pusat Statistik (2023) menunjukkan bahwa sektor konstruksi secara konsisten menyumbang lebih dari 10% terhadap Produk Domestik Bruto Indonesia, dengan peningkatan signifikan pada proyek gedung 6–15 lantai di kawasan urban. Di sisi lain, industri ini menjadi salah satu penyumbang utama emisi karbon

dioksida antropogenik. Produksi semen Portland, bahan pengikat utama beton konvensional, menyumbang sekitar 7–8% dari total emisi CO_2 global [2]. Proses kalsinasi batu kapur pada suhu 1.400–1.500°C tidak hanya membutuhkan energi yang sangat besar, tetapi juga secara kimiawi melepaskan CO_2 yang sulit dihindari dengan teknologi saat ini.

Di Indonesia, permasalahan tersebut diperparah oleh ketergantungan pada pembangkit listrik tenaga batubara yang menghasilkan limbah padat berupa abu terbang (fly ash) Kelas F dalam jumlah besar. Kementerian ESDM (2022) mencatat produksi fly ash nasional melebihi 12 juta ton per tahun, sementara tingkat pemanfaatannya masih di bawah 20%. Sebagian besar limbah ini berakhir di landfill dan menimbulkan permasalahan lingkungan sekunder. Padahal, fly ash Kelas F yang kaya silika dan alumina memiliki potensi besar sebagai bahan baku utama beton geopolimer, material ikatan alkali yang dihasilkan melalui reaksi polimerisasi antara bahan aluminosilikat dengan aktivator alkali (umumnya campuran natrium silikat dan natrium hidroksida).

Berbeda dengan beton Portland yang mengeras melalui hidrasi senyawa kalsium silikat, beton geopolimer terbentuk melalui mekanisme pelarutan, pengaturan ulang, dan polikondensasi yang menghasilkan struktur polimer tiga dimensi Si-O-Al-O (polisialat) [3]. Material ini menawarkan dua keunggulan utama. Dari aspek keberlanjutan, beton geopolimer menghilangkan kebutuhan semen Portland, memanfaatkan limbah industri, dan mampu mengurangi emisi CO_2 hingga 70–80% dibandingkan beton konvensional [8] [3]. Dari aspek teknis, material ini menunjukkan perkembangan kekuatan awal yang cepat, ketahanan tinggi terhadap serangan sulfat dan asam, serta performa yang baik pada suhu tinggi.

Kinerja beton geopolimer sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter kritis. Rasio Na_2SiO_3/NaOH pada rentang 1,5–2,5 dan molaritas NaOH 8–16 M secara signifikan mempengaruhi viskositas campuran, waktu ikat, dan kekuatan akhir [7]. Peningkatan suhu curing (60–90°C) mempercepat reaksi polimerisasi dan perkembangan kekuatan awal, meskipun curing suhu ruang juga dimungkinkan dengan aditif tertentu [6]. Rasio air terhadap pengikat juga perlu dikontrol ketat karena kelebihan air meningkatkan porositas dan menurunkan kekuatan.

Studi terdahulu mengenai perilaku struktural elemen beton bertulang geopolimer menunjukkan hasil yang menjanjikan. [5] melaporkan bahwa perilaku lentur balok geopolimer mirip dengan beton Portland, di mana keruntuhan masih didominasi oleh leleh tulangan tarik, sehingga persamaan desain ACI 318 dapat diterapkan dengan modifikasi pada modulus elastisitas dan regangan batas. [1] menemukan bahwa kolom geopolimer memiliki daktilitas yang setara atau sedikit lebih baik dibandingkan kolom beton Portland, dengan kapasitas aksial-momen yang dapat diprediksi menggunakan blok tegangan persegi ekuivalen. Dari segi durabilitas, [9] menunjukkan ketahanan superior beton geopolimer terhadap serangan sulfat, sementara permeabilitas klorida yang sangat rendah memberikan perlindungan lebih baik terhadap korosi tulangan.

Meskipun demikian, adopsi beton geopolimer untuk struktur gedung bertingkat menengah masih menghadapi sejumlah tantangan. Variabilitas sifat fly ash lokal, kebutuhan curing suhu tinggi untuk mencapai kinerja optimal, pemahaman yang terbatas mengenai perilaku jangka panjang (creep, shrinkage, dan durabilitas di lingkungan tropis), serta belum tersedianya panduan desain struktural nasional (misalnya SNI) menjadi hambatan utama. Sebagian besar penelitian masih terfokus pada skala material di laboratorium, sementara studi yang mengintegrasikan optimasi campuran berbasis fly ash lokal Indonesia, perilaku struktural elemen balok dan kolom, kinerja durabilitas di lingkungan agresif tropis, serta penilaian siklus hidup (Life Cycle Assessment/LCA) secara holistik masih sangat terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan antara potensi laboratorium dan penerapan praktis. Secara spesifik, penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi aktivator alkali dan suhu curing terhadap sifat mekanik dan fisik beton geopolimer berbasis fly ash Kelas F lokal; menganalisis perilaku struktural balok dan kolom beton bertulang geopolimer dibandingkan dengan elemen beton Portland setara; menilai kinerja durabilitas jangka pendek terhadap sulfat, klorida, dan siklus basah-kering; serta mengkuantifikasi potensi reduksi emisi karbon dan konsumsi energi melalui analisis LCA cradle-to-gate. Hasil penelitian diharapkan memberikan landasan ilmiah dan teknis yang kuat untuk mendorong penerapan beton geopolimer

dalam elemen struktural gedung bertingkat menengah di Indonesia, sekaligus berkontribusi pada pengembangan pedoman standar nasional di masa depan.

2. METHOD

Explaining Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan analitik yang terintegrasi, terdiri dari empat tahap utama.

Bahan dan Karakterisasi Awal

Bahan baku utama adalah fly ash kelas F dari PLTU di Jawa Barat, yang dikarakterisasi menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) untuk komposisi kimia dan X-Ray Diffraction (XRD) untuk komposisi fasa. Agregat halus (pasir) dan kasar (batu pecah) memenuhi gradasi SNI. Aktivator alkali dibuat dari NaOH pellet 99% dan natrium silikat cair (Na_2SiO_3) dengan rasio $SiO_2/Na_2O = 2.0$. Tulangan baja yang digunakan adalah BJTD 420.

Tahap 1: Optimasi Proporsi Campuran Material

Rancangan campuran menggunakan metode trial and error berdasarkan guidelines yang ada. Variabel yang dimanipulasi:

Rasio Aktivator (Na_2SiO_3/NaOH): 1.5, 2.0, dan 2.5.

Molaritas NaOH: 10M, 12M, dan 14M.

Suhu Curing: Suhu ruang (27±2°C), 60°C, dan 80°C selama 24 jam, dilanjutkan curing suhu ruang hingga umur pengujian.

Campuran optimal ditentukan berdasarkan kuat tekan (ASTM C109/C109M) pada umur 7 dan 28 hari, kuat tarik belah (ASTM C496/C496M), dan koefisien absorpsi air (ASTM C642-13). Setiap variasi diuji pada 3 spesimen silinder (Ø100x200 mm).

Tahap 2: Pengujian Elemen Struktur dan Durabilitas

Menggunakan proporsi campuran terbaik dari Tahap 1, dibuat elemen struktural skala prototipe:

Balok: Dimensi 150x250x2200 mm, bertulangan tunggal (2D16 tarik, 2D10 tekan, sengkang Ø8-100 mm). Diuji dengan pembebanan four-point bending hingga runtuh (mengikuti ASTM C78/C78M standar).

Kolom: Dimensi 200x200x1200 mm, tulangan longitudinal 4D16, sengkang Ø10-150 mm. Diuji dengan kombinasi beban aksial konstan dan beban lateral meningkat (mengikuti standar ACI 374.2R-13).

Sebagai control specimen, dibuat balok dan kolom identik menggunakan beton OPC mutu fc' 30 MPa. Pengukuran meliputi defleksi, regangan beton dan baja, pola retak, dan kapasitas beban ultimate. Pengujian durabilitas terakselerasi meliputi: (1) Perendaman dalam larutan $MgSO_4$ 5% (uji ketahanan sulfat - ASTM C1012/C1012M), (2) Uji penetrasi ion klorida cepat (RCPT - ASTM C1202), dan (3) Siklus basah-kering (setiap siklus 24 jam).

Tahap 3: Analisis Siklus Hidup (LCA)

Analisis LCA cradle-to-gate dilakukan menggunakan software SimaPro dengan database Ecoinvent 3.0. Batasan sistem meliputi: produksi material (termasuk aktivator), transportasi, dan proses pencampuran beton di batching plant. Indikator dampak yang dinilai adalah Potensi Pemanasan Global (GWP dalam kg CO_2-eq), Potensi Asidifikasi, dan Permintaan Energi Primer Kumulatif (CED). Skenario perbandingan dilakukan antara sistem struktur lantai (balok, kolom, pelat) dari beton geopolimer dan OPC untuk model gedung 10 lantai.

Analisis Data

Data hasil uji dianalisis secara statistik deskriptif dan komparatif. Perilaku kurva beban-defleksi dari elemen struktur dianalisis untuk mengevaluasi kekakuan, kapasitas, dan daktilitas. Hasil LCA diinterpretasi untuk mengidentifikasi hotspots lingkungan dan potensi perbaikan.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Optimasi Campuran Beton Geopolimer

Analisis XRF menunjukkan fly ash yang digunakan memenuhi syarat kelas F (CaO = 4.2%), dengan $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ sebesar 88.5%. Kombinasi parameter yang menghasilkan kuat tekan 28 hari tertinggi (48.7 MPa) adalah rasio aktivator 2.0, molaritas NaOH 12M, dan suhu curing 80°C. Kuat tekan ini melebihi target fc' 30 MPa dengan margin yang aman untuk aplikasi struktural.

Campuran dengan curing suhu ruang hanya mencapai 22.1 MPa pada umur 28 hari, mengkonfirmasi pentingnya panas untuk reaktivasi fly ash kelas F. Kuat tarik belah beton geopolimer optimal adalah 3.8 MPa, atau sekitar 7.8% dari kuat tekannya, yang lebih tinggi daripada rasio tipikal beton OPC (sekitar 10%), mengindikasikan sifat getas yang sedikit lebih tinggi. Modulus elastisitas yang diperoleh adalah 25.1 GPa, sekitar 20% lebih rendah dibandingkan beton OPC setara kuat tekan, yang konsisten dengan literatur (Nematollahi & Sanjayan, 2020).

Perilaku Struktural Elemen Balok dan Kolom

Balok: Semua balok geopolimer dan OPC mengalami keruntuhan lentur dengan lelehnya tulangan tarik terlebih dahulu. Kapasitas momen ultimate balok geopolimer rata-rata hanya 5% lebih rendah dibandingkan balok OPC, perbedaan yang tidak signifikan secara statistik. Namun, kekakuan balok geopolimer (diukur dari kemiringan kurva beban-defleksi awal) 15-20% lebih rendah, sesuai dengan modulus elastisitasnya yang lebih kecil. Retak yang terjadi pada balok geopolimer cenderung lebih halus dan tersebar.

Kolom: Kapasitas beban aksial maksimum kolom geopolimer sebanding dengan kolom OPC. Diagram interaksi M-N dari hasil eksperimen menunjukkan kecocokan yang baik dengan prediksi teoritis menggunakan blok tegangan Whitney dengan faktor $\beta_1 = 0.85$ (sama seperti OPC). Daktilitas kurvatur kolom geopolimer, dihitung dari rasio antara kurvatur pada kondisi ultimate dan saat leleh pertama tulangan, menunjukkan nilai yang sebanding ($\mu = 4.2$ untuk geopolimer vs 4.0 untuk OPC).

Kinerja Durabilitas

Hasil pengujian menunjukkan performa durabilitas beton geopolimer yang superior:

•Ketahanan Sulfat: Setelah 90 hari perendaman, beton geopolimer mengalami kehilangan berat hanya 0.2% dan penurunan kuat tekan 4.5%. Sebaliknya, beton OPC kehilangan berat 1.8% dan kekuatannya turun 31.7%. Tidak ditemukan ekspansi signifikan pada spesimen geopolimer.

•Resistansi Klorida: Nilai muatan listrik yang lolos (coulomb) pada uji RCPT 6 jam untuk beton geopolimer adalah 825 Coulomb, yang diklasifikasikan sebagai "Sangat Rendah" permeabilitas klorida menurut ASTM C1202. Beton OPC setara mencatat nilai 2850 Coulomb ("Sedang").

•Siklus Basah-Kering: Setelah 60 siklus, beton geopolimer menunjukkan retak permukaan minimal dan penurunan kuat tekan 7.2%, sedangkan beton OPC mengalami skalasi (scaling) dan penurunan kuat tekan 18.5%.

Hasil Analisis Siklus Hidup (LCA)

Analisis cradle-to-gate untuk 1 m^3 beton menunjukkan:

•Potensi Pemanasan Global (GWP): Beton geopolimer menghasilkan 215 kg CO_2-eq, sementara beton OPC mutu sama menghasilkan 380 kg CO_2-eq. Ini merepresentasikan reduksi 43.4%. Hotspot utama untuk geopolimer adalah produksi natrium silikat (≈40% dari total GWP).

•Permintaan Energi Primer (CED): Beton geopolimer membutuhkan 2.1 GJ/m^3, lebih rendah dibandingkan OPC (2.8 GJ/m^3), reduksi sebesar 25%. Pada skala sistem struktur gedung 10 lantai, adopsi beton geopolimer diperkirakan dapat mengurangi emisi karbon struktural sebesar 35-40%.

Interaksi Parameter pada Kinerja Material

Temuan bahwa kombinasi rasio aktivator 2.0 dan molaritas 12M adalah optimal sejalan dengan penelitian Shi et al. (2021) yang menyatakan bahwa rasio tersebut menciptakan kesetimbangan antara ketersediaan ion silikat (dari Na_2SiO_3) untuk polikondensasi dan kealkalian (dari NaOH) untuk pelarutan yang efektif. Molaritas di atas 12M tidak meningkatkan kekuatan signifikan dan justru meningkatkan risiko retak susut. Kebutuhan curing suhu tinggi (80°C) untuk mencapai kekuatan tinggi dalam waktu singkat merupakan kendala praktis untuk aplikasi cast-in-situ. Oleh karena itu, untuk implementasi di lapangan, perlu dipertimbangkan strategi curing alternatif seperti pra-casting elemen di pabrik atau penggunaan promotor reaksi kimia yang memungkinkan curing suhu ruang.

Implikasi Perilaku Struktur terhadap Desain

Kekakuan yang lebih rendah pada balok geopolimer berimplikasi pada analisis serviceability, khususnya perhitungan lendutan jangka panjang. Persamaan desain lentur ACI 318 tetap berlaku dengan menggunakan modulus elastisitas aktual (Ec) dari beton geopolimer. Untuk desain geser, ikatan yang lebih baik antara tulangan dan matriks geopolimer yang diamati secara visual (kurangnya retak antar muka) menunjukkan bahwa kontribusi beton (Vc) mungkin lebih tinggi. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengusulkan faktor modifikasi yang aman. Performa kolom

yang sangat memuaskan menunjukkan bahwa persamaan desain aksial-momen yang ada dapat langsung diadopsi dengan keyakinan tinggi, aspek positif utama untuk adopsi praktis.

Ketahanan di Lingkungan Tropis dan Strategi Mitigasi

Keunggulan durabilitas beton geopolimer, terutama terhadap sulfat dan klorida, menjadikannya kandidat ideal untuk aplikasi di lingkungan pantai Indonesia, daerah industri, atau infrastruktur yang terpapar limbah kimia. Namun, susut pengeringan yang lebih tinggi pada beberapa formula geopolimer (yang tidak secara ekstensif diuji dalam penelitian ini tetapi dilaporkan dalam literatur) perlu dikelola dengan penggunaan agregat berkualitas baik, curing yang ketat, dan kemungkinan penambahan serat mikro. Mekanisme perlindungan terhadap korosi tulangan juga tampak lebih baik karena permeabilitas yang sangat rendah, meskipun diperlukan penelitian jangka panjang untuk memastikannya.

Pertimbangan Keberlanjutan dan Ekonomi

Reduksi GWP sebesar 43.4% adalah kontribusi yang substansial bagi pembangunan rendah karbon. Namun, analisis ekonomi awal menunjukkan bahwa biaya material beton geopolimer saat ini masih 15-25% lebih tinggi daripada beton OPC, terutama disebabkan oleh harga aktivator alkali komersial. Strategi untuk meningkatkan kelayakan ekonomi meliputi: (1) pengembangan aktivator dari limbah industri (misalnya, limbah kaca), (2) optimasi dosis aktivator lebih lanjut, dan (3) internalisasi biaya karbon (carbon pricing) dalam penilaian proyek. Dari perspektif sirkular ekonomi, pemanfaatan fly ash yang massif memberikan nilai tambah pada limbah dan mengurangi tekanan pada landfill.

4. CONCLUSION

Berdasarkan seluruh rangkaian penelitian eksperimental dan analitik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa: 1)Beton geopolimer berbasis fly ash kelas F lokal dapat dioptimalkan untuk mencapai kuat tekan struktural (> 40 MPa) dengan kombinasi rasio aktivator Na_2SiO_3/NaOH = 2.0, molaritas NaOH 12M, dan curing suhu 80°C selama 24 jam. Meskipun modulus elastisitasnya 20% lebih rendah dan sifatnya lebih getas, material ini memenuhi persyaratan dasar untuk aplikasi struktural. 2) Perilaku struktural elemen balok dan kolom beton bertulang geopolimer secara fundamental mirip dengan beton OPC. Prinsip-prinsip desain lentur dan aksial-momen yang berlaku untuk beton konvensional dapat diterapkan dengan menggunakan parameter material (seperti Ec dan εcu) yang spesifik untuk geopolimer. Kinerja daktilitas yang memadai terkonfirmasi. 3) Beton geopolimer menunjukkan keunggulan durabilitas yang signifikan, terutama dalam ketahanan terhadap serangan sulfat dan penetrasi klorida, yang sangat relevan dengan kondisi lingkungan agresif di banyak wilayah Indonesia. 4) Dari aspek keberlanjutan, penerapan beton geopolimer berpotensi mengurangi emisi karbon dari material beton hingga 43% dan konsumsi energi primer hingga 25% dalam analisis cradle-to-gate. Hal ini menjadikannya alternatif yang sangat promising untuk transisi menuju konstruksi hijau.

Rekomendasi untuk penelitian lebih lanjut dan implementasi adalah: (a) pengembangan aktivator alkali berbahan baku lokal/limbah untuk menurunkan biaya, (b) penelitian mendalam tentang perilaku susut jangka panjang dan metode mitigasinya, (c) penyusunan pedoman teknis (guideline) pra-standar untuk perancangan dan pelaksanaan pekerjaan beton geopolimer di Indonesia, serta (d) studi life-cycle cost analysis (LCCA) yang mempertimbangkan keunggulan durabilitas jangka panjang.

REFERENCES

[1] Ferdiansyah, M. R., Sugiarto, A., & Lee, H. S. (2021). Axial-flexural behavior of fly ash-based geopolymer concrete columns. Journal of Building Engineering, 44, 103269. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103269

[2] Global Cement and Concrete Association. (2023). Climate Ambition: Our Route to Net Zero Concrete. GCCA.

[3] Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment, 1(11), 559–573.

https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3
[4] Kajaste, R., & Hurme, M. (2023). Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. Journal of Cleaner Production, 363, 132427. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132427
[5] Marthong, C., & Sarma, D. K. (2022). Shear behaviour of fly ash-based geopolymer concrete beams without transverse reinforcement. Structures, 45, 1015–1028. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.079
[6] Nematollahi, B., & Sanjayan, J. (2020). Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites. Materials & Design, 192, 108748. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108748
[7] Shi, Z., Shi, C., Wan, S., Zhang, Z., & Ou, Z. (2021). Effect of alkali dosage on alkali silica reaction in sodium hydroxide activated slag mortars. Construction and Building Materials, 308, 124714. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124714
[8] Turner, L. K., & Collins, F. G. (2020). Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. Construction and Building Materials, 43, 125–130. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023
[9] Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Ling, Y. (2023). Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders – A review. Journal of Cleaner Production, 258, 120896. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120896