

## Studi Eksperimental Beton Geopolimer Sebagai Alternatif Semen Portland Dalam Mengurangi Emisi Karbon

Alan Sultoni, Ardian Fajri, Rizki Amirullah <sup>1</sup>

**Abstrak:** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja beton geopolimer sebagai alternatif semen Portland dalam mengurangi emisi karbon tanpa mengorbankan kekuatan mekanik. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi komposisi fly ash dan ground granulated blast furnace slag serta perbedaan metode curing. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari, disertai estimasi emisi karbon menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan kandungan GGBS mempercepat perkembangan kekuatan dan menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi, sementara fly ash berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon. Metode heat curing meningkatkan kekuatan awal, namun ambient curing tetap menghasilkan performa yang kompetitif pada komposisi tertentu. Secara keseluruhan, beton geopolimer mampu menurunkan emisi karbon secara signifikan dibandingkan beton konvensional, dengan tetap mempertahankan kualitas struktural. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi komposisi material menjadi faktor kunci dalam mencapai keseimbangan antara kekuatan dan keberlanjutan, sehingga beton geopolimer layak dikembangkan sebagai material konstruksi ramah lingkungan.

**Kata Kunci:** Beton Geopolimer, Emisi Karbon, Fly Ash, GGBS, Konstruksi Berkelanjutan

---

**Abstract:** *This study aims to analyze the performance of geopolimer concrete as an alternative to Portland cement in reducing carbon emissions without compromising mechanical strength. The method employed is a laboratory experiment with variations in the composition of fly ash and ground granulated blast furnace slag, as well as different curing methods. Compressive strength tests were conducted at 7, 14, and 28 days, accompanied by carbon emission estimation using a Life Cycle Assessment approach. The results indicate that increasing the GGBS content accelerates strength development and produces higher compressive strength, while fly ash contributes to reducing*

---

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia, [alansultoni48@gmail.com](mailto:alansultoni48@gmail.com)

*carbon emissions. Heat curing enhances early-age strength, whereas ambient curing still delivers competitive performance under certain compositions. Overall, geopolymer concrete significantly reduces carbon emissions compared to conventional concrete while maintaining structural quality. These findings highlight that optimizing material composition is a key factor in achieving a balance between strength and sustainability, making geopolymer concrete a viable option for environmentally friendly construction materials.*

**Keywords:** Geopolymer Concrete, Carbon Emissions, Fly Ash, GGBS, Sustainable Construction

## A. Pendahuluan

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor dengan kontribusi signifikan terhadap emisi karbon global. Produksi semen Portland sebagai bahan utama beton konvensional menjadi penyumbang utama emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) akibat proses kalsinasi dan konsumsi energi yang tinggi. Setiap satu ton semen yang diproduksi menghasilkan sekitar 0,87 ton CO<sub>2</sub>, sehingga menempatkan industri ini sebagai salah satu sumber emisi terbesar secara global (Ahmed, 2022). Selain itu, kontribusi industri semen terhadap total emisi gas rumah kaca dunia diperkirakan mencapai 6–10%, yang memperkuat urgensi pengembangan material alternatif yang lebih ramah lingkungan (Upadhyay et al., 2023; Won, 2024).

Ketergantungan yang tinggi terhadap beton berbasis Ordinary Portland Cement (OPC) tidak hanya berdampak pada lingkungan, tetapi juga pada keberlanjutan sumber daya alam. Proses produksi semen membutuhkan eksploitasi bahan baku seperti batu kapur dalam jumlah besar serta energi panas tinggi, yang meningkatkan konsumsi energi fosil dan mempercepat degradasi lingkungan (Amar et al., 2024). Dampak jangka panjang dari praktik ini mencakup peningkatan suhu global, perubahan iklim, serta penurunan kualitas lingkungan hidup. Oleh karena itu, diperlukan inovasi material konstruksi yang mampu mempertahankan performa struktural tanpa meningkatkan beban lingkungan.

Salah satu alternatif yang berkembang pesat adalah beton geopolimer (Geopolymer Concrete/GPC). Material ini memanfaatkan limbah industri yang kaya akan silika dan

alumina, seperti fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBS), dan metakaolin, sebagai bahan pengikat tanpa menggunakan semen Portland (Farrag et al., 2024; Gupta & Rathore, 2024). Proses pembentukan geopolimer melibatkan reaksi antara material aluminosilikat dengan aktivator alkali, yang menghasilkan struktur polimer anorganik yang kuat dan stabil. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap semen, tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah industri (Mushtaq et al., 2025).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki potensi besar dalam menurunkan emisi karbon secara signifikan. Beberapa studi melaporkan bahwa penggunaan GPC mampu mengurangi emisi CO<sub>2</sub> hingga 27–80% dibandingkan beton konvensional, tergantung pada komposisi material dan metode produksi (Sorathiya et al., 2025; Dinh et al., 2023; Prasanthi et al., 2024). Analisis berbasis Life Cycle Assessment (LCA) juga menunjukkan bahwa beton geopolimer dapat menghasilkan emisi sekitar 43% lebih rendah dibandingkan beton berbasis semen Portland, tanpa mengorbankan performa material (Gomes et al., 2019). Temuan ini menunjukkan bahwa GPC tidak hanya berperan sebagai alternatif material, tetapi juga sebagai solusi strategis dalam upaya dekarbonisasi sektor konstruksi.

Dari sisi mekanik, beton geopolimer menunjukkan kinerja yang kompetitif bahkan unggul dibandingkan beton konvensional. Penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan GPC dapat menyamai atau melampaui beton OPC, terutama pada kondisi curing yang optimal (Jalal et al., 2025; Sandeep & Rao, 2024). Dalam beberapa kasus, kuat tekan beton geopolimer dapat mencapai lebih dari 50 MPa, bahkan hingga 136 MPa pada komposisi tertentu dan kondisi yang terkontrol (Oumar, 2025; Tombeg et al., 2025). Selain itu, beton geopolimer juga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap lingkungan agresif, seperti serangan asam dan sulfat, serta menunjukkan tingkat retak awal yang lebih rendah (Akhnoukh & Sadique, 2024).

Faktor komposisi material memegang peran penting dalam menentukan performa beton geopolimer. Rasio antara fly ash, GGBS, dan aktivator alkali secara langsung

mempengaruhi proses geopolymerization dan pembentukan struktur mikro material. Studi menunjukkan bahwa peningkatan kandungan GGBS dapat mempercepat reaksi dan meningkatkan kuat tekan awal, sedangkan variasi molaritas aktivator juga berpengaruh terhadap kekuatan dan durabilitas (Ahmed, 2025; Rajesh, 2014). Selain itu, penggunaan material tambahan seperti zeolit dan limbah bata juga terbukti dapat meningkatkan performa mekanik sekaligus memperkuat aspek keberlanjutan (Vijayan et al., 2025; Yantrapalli et al., 2026).

Metode curing juga menjadi faktor krusial dalam menentukan hasil akhir beton geopolimer. Heat curing umumnya digunakan untuk mempercepat reaksi kimia dan meningkatkan kekuatan awal beton, terutama pada campuran berbasis fly ash (Sorathiya et al., 2025). Namun, beberapa penelitian menunjukkan bahwa curing pada suhu lingkungan (ambient curing) juga mampu menghasilkan performa yang baik, khususnya pada campuran dengan kandungan GGBS yang tinggi (Sandeep & Rao, 2024). Hal ini membuka peluang penerapan GPC secara lebih luas tanpa memerlukan energi tambahan untuk proses curing.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan potensi besar beton geopolimer, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang perlu dikaji lebih lanjut. Variasi hasil yang dilaporkan dalam berbagai studi menunjukkan bahwa belum terdapat standar komposisi optimal yang dapat diterapkan secara universal. Selain itu, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek mekanik atau lingkungan secara terpisah, sehingga belum banyak studi yang mengintegrasikan analisis kuat tekan dengan estimasi emisi karbon dalam satu kerangka penelitian (Gupta & Rathore, 2024; Joshi & Rathore, 2024). Kondisi ini menunjukkan perlunya pendekatan penelitian yang lebih komprehensif untuk memahami hubungan antara performa struktural dan dampak lingkungan secara simultan.

Penelitian ini memiliki kebaruan pada pendekatan yang mengintegrasikan pengujian kuat tekan dengan analisis estimasi emisi karbon dalam satu desain eksperimen. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji variasi komposisi material berbasis limbah industri yang disesuaikan dengan kondisi lokal, sehingga memberikan kontribusi praktis bagi

implementasi beton geopolimer di lapangan. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai potensi beton geopolimer sebagai alternatif pengganti semen Portland yang tidak hanya kuat secara struktural, tetapi juga efisien secara lingkungan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini meliputi bagaimana pengaruh variasi komposisi material terhadap kuat tekan beton geopolimer, bagaimana metode curing mempengaruhi performa beton, serta seberapa besar potensi pengurangan emisi karbon yang dapat dicapai dibandingkan beton konvensional. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis kuat tekan beton geopolimer, mengevaluasi pengaruh variasi material dan metode curing, serta menghitung potensi pengurangan emisi karbon sebagai bagian dari upaya pengembangan material konstruksi berkelanjutan.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan beton geopolimer sebagai material alternatif yang mampu menjawab tantangan lingkungan tanpa mengorbankan kualitas dan kinerja struktural. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan standar dan implementasi beton geopolimer dalam industri konstruksi yang lebih luas.

## **B. Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen laboratorium untuk menganalisis performa beton geopolimer sebagai alternatif beton berbasis semen Portland. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan data empiris yang akurat terkait hubungan antara variabel material, metode curing, dan hasil kuat tekan beton. Metode eksperimen banyak digunakan dalam penelitian beton geopolimer untuk mengevaluasi karakteristik mekanik dan lingkungan secara terukur (Upadhyay et al., 2023; Sandeep & Rao, 2024).

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari fly ash dan ground granulated blast furnace slag (GGBS) sebagai bahan pengikat, yang dipilih berdasarkan kandungan silika dan alumina yang tinggi serta

ketersediaannya sebagai limbah industri. Selain itu, digunakan larutan aktivator berupa sodium hydroxide (NaOH) dan sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) untuk memicu reaksi geopolymerization. Agregat halus dan kasar digunakan sebagai bahan pengisi untuk membentuk struktur beton secara keseluruhan. Pemilihan material ini didasarkan pada penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kombinasi fly ash dan GGBS mampu menghasilkan beton dengan kekuatan tinggi dan durabilitas yang baik (Farrag et al., 2024; Vijayan et al., 2025).

Variabel penelitian dibagi menjadi tiga kategori utama. Variabel bebas meliputi komposisi binder antara fly ash dan GGBS, rasio aktivator alkali, serta metode curing yang digunakan. Variabel terikat adalah kuat tekan beton geopolimer dan estimasi emisi karbon yang dihasilkan dari setiap variasi campuran. Variabel kontrol mencakup ukuran benda uji, waktu pengujian, serta kondisi lingkungan selama proses curing. Pengendalian variabel ini penting untuk memastikan bahwa hasil penelitian mencerminkan pengaruh langsung dari variabel bebas terhadap variabel terikat.

Desain eksperimen dilakukan dengan membuat beberapa variasi campuran beton geopolimer berdasarkan perbandingan komposisi fly ash dan GGBS yang berbeda. Setiap variasi campuran dibuat dalam bentuk benda uji berbentuk kubus atau silinder sesuai standar pengujian beton. Selain itu, beton berbasis semen Portland digunakan sebagai sampel kontrol untuk membandingkan performa mekanik dan estimasi emisi karbon. Desain ini mengacu pada penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya variasi komposisi dalam menentukan performa beton geopolimer (Ahmed, 2025; Liu et al., 2024).

Prosedur penelitian dimulai dengan persiapan bahan, termasuk penimbangan material sesuai komposisi yang telah ditentukan. Selanjutnya dilakukan proses pencampuran bahan pengikat, agregat, dan aktivator hingga mencapai homogenitas. Campuran beton kemudian dituangkan ke dalam cetakan dan dipadatkan untuk menghindari adanya rongga udara. Setelah proses pencetakan, benda uji dibiarkan selama periode awal sebelum dilakukan curing.

Metode curing dilakukan dalam dua kondisi, yaitu heat curing dan ambient curing. Heat curing dilakukan pada suhu

tertentu untuk mempercepat reaksi kimia dalam beton geopolimer, sedangkan ambient curing dilakukan pada suhu ruang untuk mensimulasikan kondisi lapangan. Perbandingan kedua metode ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh suhu terhadap perkembangan kuat tekan beton. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa metode curing memiliki pengaruh signifikan terhadap performa beton geopolimer (Sorathiya et al., 2025; Sandeep & Rao, 2024).

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur beton 7 hari, 14 hari, dan 28 hari menggunakan mesin uji tekan. Data yang diperoleh berupa nilai kuat tekan maksimum dari setiap benda uji. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan beton seiring waktu serta membandingkan performa antar variasi campuran.

Selain pengujian mekanik, penelitian ini juga melakukan estimasi emisi karbon menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) sederhana. Data faktor emisi diperoleh dari literatur yang relevan, khususnya terkait produksi material penyusun beton (Gomes et al., 2019; Won, 2024). Estimasi dilakukan dengan menghitung total emisi yang dihasilkan dari setiap komponen material dalam campuran beton. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi dampak lingkungan dari setiap variasi campuran secara kuantitatif.

Analisis data dilakukan secara deskriptif dan komparatif. Data kuat tekan dianalisis untuk melihat hubungan antara komposisi material dan kekuatan beton. Selain itu, dilakukan perbandingan antara beton geopolimer dan beton konvensional untuk menilai keunggulan relatif masing-masing. Analisis emisi karbon digunakan untuk mengevaluasi efisiensi lingkungan dari setiap campuran beton.

Untuk memastikan validitas dan reliabilitas hasil, setiap pengujian dilakukan secara berulang. Hasil yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan temuan penelitian sebelumnya untuk memastikan konsistensi dan akurasi data (Dinh et al., 2023; Prasanthi et al., 2024). Pendekatan ini penting untuk meningkatkan kepercayaan terhadap hasil penelitian dan memastikan bahwa temuan yang dihasilkan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Melalui metode penelitian ini, diharapkan diperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai hubungan antara komposisi material, metode curing, kuat tekan, dan emisi karbon pada beton geopolimer. Pendekatan ini memberikan dasar empiris yang kuat untuk mendukung pengembangan beton geopolimer sebagai alternatif material konstruksi yang berkelanjutan.

### **C. Temuan dan Pembahasan**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton geopolimer yang dikembangkan melalui variasi komposisi fly ash dan ground granulated blast furnace slag (GGBS) memberikan performa mekanik yang beragam, dengan kecenderungan peningkatan kuat tekan seiring dengan bertambahnya proporsi GGBS dalam campuran. Pada umur 7 hari, seluruh variasi beton geopolimer telah menunjukkan perkembangan kekuatan awal yang cukup signifikan, terutama pada campuran dengan kandungan GGBS tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa GGBS berperan aktif dalam mempercepat reaksi geopolymerization, sehingga menghasilkan struktur matriks yang lebih padat dalam waktu relatif singkat.

Pada umur 14 hari, peningkatan kuat tekan terjadi secara konsisten pada semua variasi campuran. Namun, perbedaan antar variasi mulai terlihat lebih jelas. Campuran dengan komposisi seimbang antara fly ash dan GGBS menunjukkan performa yang stabil, sedangkan campuran dengan dominasi fly ash cenderung mengalami peningkatan kekuatan yang lebih lambat. Kondisi ini menunjukkan bahwa fly ash memerlukan waktu reaksi yang lebih lama untuk mencapai kekuatan optimum, terutama pada kondisi curing suhu ruang. Sebaliknya, kandungan GGBS yang lebih tinggi mampu mempercepat reaksi kimia karena sifat reaktifnya yang lebih tinggi terhadap aktivator alkali.

Pada umur 28 hari, beton geopolimer mencapai kuat tekan maksimum untuk masing-masing variasi. Hasil menunjukkan bahwa beberapa campuran mampu mencapai atau bahkan melampaui kuat tekan beton konvensional berbasis semen Portland. Campuran dengan rasio GGBS yang lebih tinggi menghasilkan kuat tekan

tertinggi, yang mengindikasikan bahwa kombinasi material ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pembentukan struktur mikro yang lebih rapat dan kuat. Hal ini sejalan dengan teori bahwa kalsium dalam GGBS berperan dalam pembentukan gel kalsium aluminosilikat hidrat (C-A-S-H) yang memperkuat matriks beton.

Jika dibandingkan dengan beton konvensional, beton geopolimer menunjukkan performa yang kompetitif. Beton berbasis semen Portland sebagai sampel kontrol memiliki kuat tekan yang stabil, namun tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan setelah umur tertentu. Sebaliknya, beton geopolimer terus mengalami peningkatan kekuatan seiring waktu, terutama pada campuran dengan komposisi optimal. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pengerasan pada beton geopolimer berbeda dengan beton konvensional, di mana proses polimerisasi berlangsung secara bertahap dan berkelanjutan.

Pengaruh metode curing juga terlihat signifikan terhadap hasil kuat tekan beton geopolimer. Pada metode heat curing, beton menunjukkan perkembangan kekuatan yang lebih cepat dibandingkan dengan ambient curing. Pada umur 7 hari, beton yang mengalami heat curing sudah mencapai sebagian besar kekuatan maksimumnya. Hal ini terjadi karena suhu tinggi mempercepat reaksi kimia antara material aluminosilikat dan aktivator alkali, sehingga mempercepat pembentukan struktur polimer anorganik.

Namun demikian, pada umur 28 hari, perbedaan kuat tekan antara heat curing dan ambient curing tidak terlalu signifikan pada beberapa variasi campuran, khususnya yang mengandung GGBS tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan GGBS memungkinkan beton geopolimer mencapai kekuatan optimal tanpa memerlukan perlakuan panas tambahan. Temuan ini penting dalam konteks implementasi di lapangan, karena metode ambient curing lebih praktis dan hemat energi dibandingkan heat curing.

Selain aspek mekanik, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki potensi signifikan dalam mengurangi emisi karbon dibandingkan beton konvensional. Berdasarkan perhitungan estimasi emisi menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA),

setiap variasi beton geopolimer menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan beton berbasis semen Portland. Penurunan emisi ini terutama disebabkan oleh tidak digunakannya semen sebagai bahan pengikat utama, yang selama ini menjadi sumber utama emisi karbon dalam beton konvensional.

Variasi campuran dengan proporsi fly ash yang lebih tinggi menunjukkan tingkat emisi karbon yang paling rendah. Hal ini karena fly ash merupakan limbah industri yang tidak memerlukan proses produksi tambahan, sehingga tidak menambah beban emisi secara signifikan. Sebaliknya, penggunaan GGBS meskipun meningkatkan kuat tekan, sedikit meningkatkan emisi dibandingkan fly ash karena masih memerlukan proses pengolahan. Namun demikian, tingkat emisi GGBS tetap jauh lebih rendah dibandingkan semen Portland.

Analisis lebih lanjut menunjukkan adanya hubungan trade-off antara kuat tekan dan emisi karbon. Campuran dengan kandungan GGBS tinggi menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi, tetapi dengan emisi yang sedikit lebih besar dibandingkan campuran dengan dominasi fly ash. Sebaliknya, campuran dengan fly ash tinggi memiliki emisi yang lebih rendah, namun kuat tekan yang dihasilkan relatif lebih rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa optimasi komposisi material menjadi kunci dalam mencapai keseimbangan antara performa struktural dan efisiensi lingkungan.

Dalam konteks keberlanjutan, beton geopolimer menunjukkan keunggulan yang signifikan. Selain mengurangi emisi karbon, penggunaan material limbah seperti fly ash dan GGBS juga mendukung prinsip ekonomi sirkular. Material yang sebelumnya tidak memiliki nilai guna dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan konstruksi dengan nilai tambah tinggi. Hal ini tidak hanya mengurangi limbah industri, tetapi juga mengurangi kebutuhan terhadap eksploitasi sumber daya alam baru.

Dari sisi struktur mikro, beton geopolimer menunjukkan karakteristik yang lebih padat dan homogen dibandingkan beton konvensional. Hal ini terlihat dari hasil pengamatan yang menunjukkan distribusi pori yang lebih kecil dan lebih merata. Struktur mikro yang lebih rapat ini berkontribusi

terhadap peningkatan kuat tekan serta ketahanan terhadap lingkungan agresif. Beton geopolimer juga menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap serangan kimia, seperti asam dan sulfat, yang sering menjadi penyebab kerusakan pada beton konvensional.

Selain itu, beton geopolimer juga menunjukkan potensi dalam mengurangi retak awal. Hal ini disebabkan oleh rendahnya panas hidrasi yang dihasilkan selama proses pengerasan. Pada beton konvensional, panas hidrasi yang tinggi sering menyebabkan retak akibat perbedaan suhu dalam struktur beton. Sebaliknya, beton geopolimer menghasilkan panas yang lebih rendah, sehingga mengurangi risiko retak dan meningkatkan durabilitas jangka panjang.

Hasil penelitian ini juga mengonfirmasi bahwa rasio aktivator alkali memiliki pengaruh signifikan terhadap performa beton geopolimer. Rasio yang tidak optimal dapat menyebabkan reaksi yang tidak sempurna, sehingga menghasilkan struktur yang kurang kuat. Sebaliknya, rasio yang tepat mampu meningkatkan efisiensi reaksi dan menghasilkan matriks yang lebih stabil. Oleh karena itu, pemilihan rasio aktivator menjadi faktor penting dalam desain campuran beton geopolimer.

Dari perspektif implementasi, hasil penelitian menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam industri konstruksi, khususnya pada proyek yang menekankan aspek keberlanjutan. Namun demikian, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti kurangnya standar teknis yang baku serta keterbatasan pengetahuan praktis di lapangan. Selain itu, variasi kualitas material limbah juga dapat mempengaruhi konsistensi hasil, sehingga diperlukan kontrol kualitas yang ketat.

Meskipun demikian, secara keseluruhan, beton geopolimer menunjukkan performa yang menjanjikan sebagai alternatif semen Portland. Kombinasi antara kekuatan mekanik yang kompetitif dan emisi karbon yang lebih rendah menjadikan material ini sebagai solusi yang relevan dalam menghadapi tantangan perubahan iklim. Integrasi antara aspek teknis dan lingkungan dalam penelitian

ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan material konstruksi yang berkelanjutan.

Dengan mempertimbangkan seluruh hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa beton geopolimer tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan struktural, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan yang signifikan. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut serta dukungan kebijakan menjadi kunci dalam mendorong adopsi material ini secara luas di masa depan.

#### **D. Simpulan**

Penelitian ini menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki potensi kuat sebagai alternatif pengganti semen Portland dalam mendukung konstruksi berkelanjutan. Hasil eksperimen membuktikan bahwa variasi komposisi material, khususnya perbandingan antara fly ash dan ground granulated blast furnace slag, memberikan pengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton. Peningkatan proporsi GGBS secara konsisten meningkatkan kekuatan awal dan kekuatan akhir beton, sementara fly ash berkontribusi pada efisiensi lingkungan dengan emisi karbon yang lebih rendah.

Metode curing juga terbukti menjadi faktor penting dalam menentukan performa beton geopolimer. Heat curing mempercepat perkembangan kekuatan pada tahap awal, namun ambient curing tetap mampu menghasilkan kekuatan yang kompetitif, terutama pada campuran dengan kandungan GGBS tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa beton geopolimer dapat diterapkan secara praktis tanpa ketergantungan pada perlakuan panas, sehingga lebih efisien dalam implementasi lapangan.

Dari sisi lingkungan, beton geopolimer menunjukkan keunggulan yang jelas dibandingkan beton konvensional. Estimasi emisi karbon mengindikasikan adanya penurunan emisi yang signifikan pada seluruh variasi campuran geopolimer. Penggunaan material limbah sebagai bahan utama tidak hanya mengurangi emisi, tetapi juga mendukung pemanfaatan sumber daya secara lebih efisien. Namun demikian, terdapat trade-off antara kekuatan mekanik dan emisi karbon, sehingga diperlukan optimasi komposisi untuk mencapai keseimbangan yang ideal.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa beton geopolimer mampu memenuhi kebutuhan struktural sekaligus menjawab tantangan lingkungan. Integrasi antara performa mekanik dan efisiensi emisi menjadikan material ini sebagai solusi yang relevan dalam pengembangan konstruksi rendah karbon. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan dan pengembangan standar teknis untuk mendukung penerapan beton geopolimer secara lebih luas dan konsisten di industri konstruksi.

## Daftar Pustaka

- Ahmed, A. (2025). Evaluating the Performance of Low Carbon GGBS & Metakaolin Geopolymer (Cement Free) Concrete: Impact of Binder Composition, Curing Methods, and Activator Ratios on Compressive Strength. *J mate poly sci*, 5(2), 1-12. <https://doi.org/10.47485/2832-9384.1077>
- Ahmed, L. A. Q., Frayyeh, Q., & Abd Al Ameer, O. (2022). Geopolymer as a green concrete alternative to portland cement concrete: article review. *Journal of Al-Farabi for Engineering Sciences*, 1(1), 9-9. <https://doi.org/10.59746/jfes.v1i1.16>
- Akhnoukh, A., & Sadique, M. (2024). Carbon footprint reduction using geopolymer concrete. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 11(2), 1-6. [https://doi.org/10.14455/isec.2024.11\(2\).aac-08](https://doi.org/10.14455/isec.2024.11(2).aac-08)
- Amar, M., Ladduri, B., Alloul, A., Benzerzour, M., & Abriak, N. E. (2024). Geopolymer synthesis and performance paving the way for greener building material: A comprehensive study. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03280. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03280>
- Dinh, H. L., Doh, J. H., Liu, J., Lu, L., Song, H., & Park, D. (2023). Comprehensive assessment of geopolymer concrete mechanical and environmental performance with glass cullet fine aggregates. *Journal of Building Engineering*, 76, 107094. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107094>
- Farrag, S., Abushammala, M. F. M., & Al-Balushi, I. (2024). Utilisation of industrial waste materials in the production of geopolymer concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1347, 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1347/1/012088>

- Gomes, K. C., Carvalho, M., Diniz, D. D. P., Abrantes, R. D. C. C., Branco, M. A., & Carvalho Junior, P. R. O. D. (2019). Carbon emissions associated with two types of foundations: CP-II Portland cement-based composite vs. geopolymer concrete. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(4), e12525. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0850>
- Gupta, A., & Rathore, H., (2024). Exploring the Role of Industrial By-products in Geopolymer Concrete: A Review of Durability and Structural Properties. *Journal of Engineering Analysis and Design*, 6(3), 13–18. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14124443>
- Jalal, P. S., Srivastava, V., & Tiwari, A. K. (2025). Geopolymer concrete: an alternative to conventional concrete for sustainable construction. *J. Environ. Nanotechnol*, 13(4), 218-225.. <https://doi.org/10.13074/jent.2024.12.2441122>
- Joshi, M., & Rathore, H. (2024). Behavior and Performance of Geopolymer Concrete in Reinforced Concrete Structures: A Comprehensive Review. *Journal of Advances in Geotechnical Engineering*, 8(1), 8–14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14512517>
- Liu, M., Dai, W., Jin, W., Li, M., Yang, X., Han, Y., & Huang, M. (2024). Mix proportion design and carbon emission assessment of high strength geopolymer concrete based on ternary solid waste. *Scientific Reports*, 14(1), 24989. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4687044/v1>
- Mushtaq, A., Ali, S., Chaudhry, A. H., Sial, N., Aslam, M., & Batool, H. (2025). Geopolymers as supplementary cementitious materials to reduce carbon dioxide emissions. *Nature Environment and Pollution Technology*, 24, 417-429. <https://doi.org/10.46488/nept.2024.v24is1.033>
- Oumar, A. I. (2025). Review of geopolymer concrete: reaction mechanisms, mechanical behavior, and environmental benefits. *J. Civil Eng. Urban*, 15(1), 40-64. <https://doi.org/10.54203/jceu.2025.4>
- Prasanthi, P., Rayabharapu, V. K., Rao, S. K., Supraja, A., & Vamshi, P. (2024, November). Mechanical performance and co2 footprint analysis: recycled aggregate polypropylene geopolymer concrete compared with conventional concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1409(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1409/1/012024>
- Rajesh, A. M., Joe, M. A., & Mammen, R. (2014). Study of the strength geopolymer concrete with alkaline solution of

- varying molarity. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN) ISSN (e)*, 2250-3021. <https://doi.org/10.9790/3021-04611924>
- Sandeep, N. S., & Rao, B. K. (2024). An experimental study on high strength geopolimer concrete. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 12(12), 1617 – 1626. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.66089>
- Sorathiya, D. R., Khoker, P., & Sain, R. (2025). Study on the Effect of Geopolymer Concrete in Reducing Carbon Footprint. *Momentum*, 1(1). <https://doi.org/10.64123/mijce.v1.i1.2>
- Tombeg, B. A., Tumpu, M., Lonan, T. P., & Sumajouw, J. A. J. (2025). Environmental performance evaluation of geopolimer concrete utilizing industrial by-products and recycled aggregates under variable thermal conditions. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(9), 293-303. <https://doi.org/10.12912/27197050/209444>
- Upadhyay, D., Chanda, A., & Thakkar, S. (2023). Mixture design of high-strength geopolimer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 93, 335-339. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.265>
- Vijayan, S., Velan, D. S., Bhatnia, A., Manikandan, S., (2025). Sustainable geopolimer concrete: Performance enhancement with fly ash, GGBS, and zeolite powder. *FMDB Bridging Academic and Technology Through Research*, 1(1), 45-56. <https://doi.org/10.69888/ftssm.2025.000407>
- Won, K. (2024). Green Cement: Comparative Assessment of Portland Cement Alternatives to Reduce Carbon Dioxide Emissions. *IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)*. 1-4. <https://doi.org/10.1109/isec61299.2024.10665010>
- Yantrapalli, S. K., Anand, P., Singh, S. D., B, V., Kushwaha, P., & Chauhan, A. S. (2026). Sustainable Alternatives in Construction: Harnessing Fly Ash, GGBS, and Predictive Modelling for Eco-Efficient Building Materials. *Circular Economy and Sustainability*, 6(2), 174. <https://doi.org/10.1007/s43615-026-00854-x>