

Pengembangan Beton Ramah Lingkungan Berbasis Limbah Industri Untuk Meningkatkan Kinerja Dan Keberlanjutan Struktur

Rahmat Hidayat, Haikal Aswaldi, Heru Kurniawan ¹

Abstrak: Penelitian ini bertujuan mengembangkan beton ramah lingkungan berbasis limbah industri serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap kinerja mekanik, durabilitas, dan keberlanjutan lingkungan. Material limbah meliputi fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBS), silica fume, waste glass powder, dan copper slag sebagai substitusi sebagian semen Portland. Metode menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium dengan variasi substitusi 0%–30% serta pengujian pada beton segar dan beton keras. Parameter uji mencakup workability, kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, permeabilitas air, penetrasi klorida, serta ketahanan terhadap lingkungan agresif. Analisis keberlanjutan dilakukan melalui estimasi emisi karbon dioksida dan konsumsi energi. Hasil menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah industri meningkatkan kinerja beton pada kadar substitusi tertentu. Kuat tekan meningkat signifikan pada variasi menengah akibat reaksi pozzolanik dan densifikasi struktur mikro. Peningkatan juga terjadi pada kuat tarik dan kuat lentur melalui kombinasi material yang optimal. Durabilitas meningkat melalui penurunan permeabilitas serta peningkatan ketahanan terhadap ion klorida dan serangan kimia. Dari sisi lingkungan, substitusi semen menurunkan emisi karbon dan konsumsi energi secara signifikan. Komposisi optimum berada pada rentang substitusi menengah yang memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan, ketahanan, dan dampak lingkungan. Penelitian ini menegaskan beton limbah sebagai solusi konstruksi berkelanjutan.

Kata Kunci: Beton Ramah Lingkungan, Limbah Industri, Kinerja Mekanik, Durabilitas Beton, Keberlanjutan Konstruksi

Abstract: *This study aims to develop environmentally friendly concrete based on industrial waste and to evaluate its effects on mechanical performance, durability, and environmental sustainability. The waste materials considered include fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBS), silica fume, waste glass powder, and copper slag as partial replacements for*

¹ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Malikussaleh, Indonesia, rahmathidayat902@gmail.com

Portland cement. The research employs a laboratory-based experimental approach with substitution levels ranging from 0% to 30%, involving tests on both fresh and hardened concrete. The evaluated parameters include workability, compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, water permeability, chloride penetration, and resistance to aggressive environments. Sustainability analysis is conducted through the estimation of carbon dioxide emissions and energy consumption. The results show that the incorporation of industrial waste enhances concrete performance at certain substitution levels. Compressive strength increases significantly at intermediate replacement levels due to pozzolanic reactions and microstructure densification. Improvements are also observed in tensile and flexural strength through optimal material combinations. Durability is enhanced through reduced permeability and increased resistance to chloride ions and chemical attacks. From an environmental perspective, cement substitution significantly reduces carbon emissions and energy consumption. The optimal composition is found within the intermediate substitution range, providing the best balance between strength, durability, and environmental impact. This study confirms that waste-based concrete represents a viable solution for sustainable construction.

Keywords: *Eco-Friendly Concrete, Industrial Waste, Mechanical Performance, Concrete Durability, Construction Sustainability*

A. Pendahuluan

Industri konstruksi memiliki peran penting dalam pembangunan infrastruktur global, namun sektor ini juga menjadi salah satu penyumbang terbesar emisi karbon dioksida dan konsumsi sumber daya alam. Produksi semen Portland sebagai bahan utama beton membutuhkan energi tinggi dan menghasilkan emisi CO₂ dalam jumlah besar. Kondisi ini menimbulkan tekanan lingkungan yang signifikan, terutama di tengah meningkatnya kebutuhan pembangunan di berbagai negara berkembang. Beberapa studi menunjukkan bahwa sektor semen dan beton berkontribusi besar terhadap jejak karbon global, sehingga diperlukan inovasi material yang lebih berkelanjutan untuk mengurangi dampak tersebut (Manan et al., 2025).

Peningkatan kebutuhan infrastruktur juga mempercepat eksploitasi sumber daya alam seperti pasir,

batu, dan batu kapur. Eksploitasi ini tidak hanya menyebabkan degradasi lingkungan, tetapi juga meningkatkan biaya produksi konstruksi. Di sisi lain, akumulasi limbah industri seperti fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBS), silica fume, limbah kaca, copper slag, dan limbah marmer terus meningkat sebagai hasil dari aktivitas industri energi, logam, dan manufaktur. Limbah tersebut sering kali belum dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik (Parvez et al., 2024; Bhede et al., 2024).

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa limbah industri dapat digunakan sebagai bahan substitusi dalam campuran beton. Fly ash dan GGBS telah terbukti meningkatkan kinerja mekanik dan durabilitas beton melalui reaksi pozzolanik yang memperbaiki struktur mikro beton (Nair et al., 2025). Selain itu, silica fume mampu meningkatkan densitas matriks beton sehingga mengurangi porositas dan meningkatkan kuat tekan. Waste glass powder juga menunjukkan potensi signifikan sebagai substitusi semen dengan peningkatan kuat tekan hingga lebih dari 30% pada komposisi tertentu (Gomaa et al., 2025). Copper slag dan material limbah lainnya juga dilaporkan mampu meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap lingkungan agresif (Ranjith & Sekar, 2025).

Selain peningkatan sifat mekanik, penggunaan material limbah dalam beton juga memberikan kontribusi signifikan terhadap aspek lingkungan. Pengurangan penggunaan semen secara langsung berdampak pada penurunan emisi CO₂ dan konsumsi energi produksi. Beberapa studi menunjukkan bahwa substitusi material semen dengan limbah industri dapat menurunkan emisi karbon secara signifikan tanpa mengorbankan kualitas beton (Bakhoum & Mater, 2022). Pendekatan ini juga mendukung konsep ekonomi sirkular yang menekankan pemanfaatan kembali limbah sebagai sumber daya bernilai tambah (Wang et al., 2023).

Dalam konteks durabilitas, beton berbasis limbah industri menunjukkan performa yang lebih baik dalam beberapa kondisi lingkungan ekstrem. Penelitian menunjukkan bahwa beton dengan campuran fly ash dan

GGBS memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap penetrasi klorida dan serangan sulfat dibandingkan beton konvensional (Disale et al., 2024). Hal ini disebabkan oleh struktur mikro yang lebih rapat dan rendahnya porositas yang dihasilkan dari reaksi pozzolanik jangka panjang. Dengan demikian, penggunaan limbah industri tidak hanya meningkatkan kekuatan awal, tetapi juga memperpanjang umur layanan struktur beton.

Meskipun berbagai hasil penelitian menunjukkan potensi besar penggunaan limbah industri dalam beton, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diperhatikan. Variasi karakteristik limbah seperti ukuran partikel, kandungan kimia, dan reaktivitas dapat mempengaruhi konsistensi hasil beton (Alkhatib et al., 2020). Selain itu, banyak penelitian masih berfokus pada satu jenis limbah tanpa mempertimbangkan kombinasi beberapa material secara simultan. Pendekatan tersebut membatasi potensi optimalisasi kinerja beton karena setiap material memiliki kontribusi yang berbeda terhadap sifat mekanik dan durabilitas (Jacob, 2025).

Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu juga masih berfokus pada aspek mekanik saja tanpa mengintegrasikan analisis keberlanjutan secara menyeluruh. Evaluasi yang hanya berbasis kuat tekan tidak cukup untuk menilai kinerja material dalam konteks pembangunan berkelanjutan. Diperlukan pendekatan yang menggabungkan aspek mekanik, durabilitas, serta dampak lingkungan seperti emisi karbon dan konsumsi energi untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif (Ganesh Kumar & Gupta, 2025). Beberapa penelitian terbaru mulai mengadopsi pendekatan Life Cycle Assessment (LCA), namun implementasinya masih terbatas pada studi tertentu (Ranjith & Sekar, 2025).

Kesenjangan penelitian lainnya terletak pada kurangnya pendekatan optimasi dalam menentukan komposisi campuran beton berbasis limbah industri. Banyak studi hanya menggunakan variasi persentase terbatas tanpa analisis sistematis untuk menentukan komposisi optimum. Hal ini menyebabkan hasil yang diperoleh belum dapat dijadikan acuan umum dalam praktik konstruksi (Rai et al., 2025). Selain itu, integrasi antara limbah industri dan limbah pertanian

dalam satu sistem beton juga masih jarang dilakukan, padahal kombinasi tersebut berpotensi meningkatkan performa material secara signifikan (Akbar et al., 2025).

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan pengembangan beton ramah lingkungan berbasis limbah industri yang tidak hanya meningkatkan kinerja mekanik, tetapi juga mempertimbangkan aspek durabilitas dan keberlanjutan lingkungan secara simultan. Pendekatan ini penting untuk menjawab tantangan pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi yang menuntut efisiensi sumber daya, pengurangan emisi karbon, serta peningkatan umur layanan struktur.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada pengembangan desain campuran beton berbasis kombinasi beberapa limbah industri yang dioptimalkan untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan, durabilitas, dan dampak lingkungan. Pendekatan ini berbeda dari penelitian sebelumnya yang cenderung menggunakan satu jenis limbah atau hanya berfokus pada aspek tertentu saja. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan yang lebih aplikatif dan efisien.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif yang dilakukan di laboratorium material konstruksi. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan pengamatan langsung terhadap pengaruh variasi campuran limbah industri terhadap karakteristik beton. Metode eksperimental ini mengacu pada berbagai penelitian sebelumnya yang juga menggunakan pendekatan laboratorium dalam pengembangan beton ramah lingkungan (Nagalakshmi, 2025; Swaroop et al., 2025a).

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen Portland sebagai bahan pengikat utama. Selain itu, digunakan beberapa jenis limbah industri sebagai material substitusi, yaitu fly ash, ground granulated blast furnace slag (GGBS), silica fume, waste glass powder, dan copper slag. Material tersebut dipilih berdasarkan potensi

pozzolanik dan kontribusinya terhadap peningkatan sifat mekanik beton. Agregat halus dan agregat kasar digunakan sebagai bahan dasar pembentuk struktur beton, sedangkan air digunakan sebagai media reaksi hidrasi. Penggunaan material limbah ini mengacu pada berbagai studi yang menunjukkan peningkatan performa beton melalui substitusi sebagian semen dan agregat (Gomaa et al., 2025; Nair et al., 2025).

Desain campuran beton dilakukan dengan variasi substitusi semen menggunakan limbah industri sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30%. Variasi ini digunakan untuk mengetahui pengaruh peningkatan kadar limbah terhadap sifat beton. Rasio air terhadap semen (water cement ratio) ditetapkan berdasarkan standar umum perancangan beton dan disesuaikan untuk mencapai workability yang baik. Dalam beberapa variasi, penggunaan bahan tambah (admixture) dilakukan untuk menjaga konsistensi workability campuran. Pendekatan desain campuran ini mengikuti metode optimasi yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya (Akbar et al., 2025; Rai et al., 2025).

Proses pembuatan beton dilakukan dengan menimbang seluruh material sesuai proporsi yang telah ditentukan. Seluruh bahan kemudian dicampur menggunakan concrete mixer hingga mencapai homogenitas yang diinginkan. Setelah itu, campuran beton dituangkan ke dalam cetakan berbentuk kubus dan silinder sesuai kebutuhan pengujian. Sampel kemudian dirawat menggunakan metode curing dalam air selama 7, 14, dan 28 hari untuk memastikan proses hidrasi berjalan optimal.

Pengujian beton segar dilakukan menggunakan slump test untuk mengetahui tingkat workability campuran. Pengujian ini penting untuk memastikan bahwa beton masih dapat dikerjakan dengan baik sebelum proses pengerasan. Hasil slump juga digunakan untuk mengevaluasi pengaruh limbah industri terhadap sifat plastis beton. Pengujian ini merujuk pada pendekatan yang digunakan dalam penelitian sebelumnya terkait beton ramah lingkungan (Bhede et al., 2024).

Setelah proses curing, dilakukan pengujian beton keras yang meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan universal

testing machine untuk mengetahui kapasitas maksimum beton dalam menahan beban tekan. Pengujian kuat tarik belah dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan beton terhadap gaya tarik tidak langsung, sedangkan uji kuat lentur digunakan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan beban lentur. Parameter ini digunakan secara luas dalam penelitian beton berbasis limbah industri (Kumar & Kumar, 2025; Miranda et al., 2024).

Selain pengujian mekanik, dilakukan juga pengujian durabilitas beton yang mencakup permeabilitas air, penetrasi klorida, serta ketahanan terhadap lingkungan agresif seperti larutan asam dan sulfat. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan beton dalam mempertahankan kinerjanya dalam jangka panjang. Beton dengan struktur mikro yang lebih padat diharapkan memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap penetrasi zat berbahaya (Disale et al., 2024; Nair et al., 2025).

Analisis keberlanjutan dilakukan dengan menghitung estimasi emisi karbon dioksida (CO₂) dan konsumsi energi dari setiap variasi campuran beton. Perhitungan dilakukan berdasarkan kontribusi masing-masing material terhadap total emisi produksi. Selain itu, pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) sederhana digunakan untuk memberikan gambaran dampak lingkungan dari setiap campuran. Pendekatan ini mengacu pada penelitian yang menekankan pentingnya evaluasi lingkungan dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan (Ranjith & Sekar, 2025).

Data yang diperoleh dari seluruh pengujian dianalisis secara deskriptif kuantitatif. Perbandingan dilakukan antar variasi campuran untuk menentukan pengaruh masing-masing limbah industri terhadap kinerja beton. Komposisi optimum ditentukan berdasarkan kombinasi terbaik antara kuat tekan maksimum, durabilitas tertinggi, dan dampak lingkungan terendah. Pendekatan ini memungkinkan pemilihan desain campuran yang paling efisien dari segi teknis dan lingkungan.

Untuk memastikan validitas hasil, setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali (triplicate test). Standar pengujian mengacu pada standar internasional ASTM dan SNI yang berlaku dalam bidang material konstruksi. Hasil

penelitian juga dibandingkan dengan temuan dari penelitian sebelumnya untuk memastikan konsistensi dan relevansi hasil yang diperoleh (Pitroda et al., 2025; Ganesh Kumar & Gupta, 2025).

Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam pengembangan beton ramah lingkungan berbasis limbah industri yang tidak hanya unggul dalam aspek mekanik, tetapi juga memiliki nilai keberlanjutan yang tinggi serta aplikatif dalam dunia konstruksi modern.

C. Temuan dan Pembahasan

Penelitian ini menghasilkan temuan utama bahwa penggunaan limbah industri dalam campuran beton memberikan peningkatan kinerja mekanik, peningkatan durabilitas, serta penurunan dampak lingkungan secara simultan. Variasi substitusi material seperti fly ash, GGBS, silica fume, waste glass powder, dan copper slag menunjukkan respons berbeda terhadap sifat beton segar dan beton keras. Hasil pengujian menunjukkan adanya hubungan kuat antara komposisi campuran dan karakteristik akhir beton, baik dari aspek kekuatan, ketahanan, maupun keberlanjutan lingkungan.

Kinerja Beton Segar

Hasil pengujian slump menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran masih berada dalam rentang workability yang dapat diterima untuk pekerjaan konstruksi struktural. Namun, peningkatan kadar limbah industri tertentu menyebabkan perubahan signifikan pada nilai slump. Campuran dengan kandungan waste glass powder dan copper slag dalam proporsi tinggi menunjukkan kecenderungan penurunan workability akibat bentuk partikel yang lebih kasar dan sifat permukaan yang kurang halus.

Sebaliknya, campuran yang mengandung fly ash dan GGBS menunjukkan peningkatan workability. Hal ini terjadi karena kedua material tersebut memiliki bentuk partikel yang lebih halus dan sifat bola mikro yang meningkatkan efek pelumasan dalam campuran beton. Temuan ini sejalan dengan karakteristik material pozzolan yang telah dilaporkan

dalam studi sebelumnya, di mana fly ash meningkatkan kemudahan pengerjaan beton tanpa mengurangi kualitas mekanik secara signifikan (Nair et al., 2025; Dyavappanavar et al., 2024).

Perubahan workability ini menunjukkan bahwa pemilihan kombinasi limbah industri harus mempertimbangkan keseimbangan antara sifat fisik material dan kebutuhan aplikasi di lapangan. Campuran optimal tidak hanya ditentukan oleh kekuatan akhir, tetapi juga oleh kemampuan material untuk dikerjakan secara efektif pada tahap awal.

Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan peningkatan signifikan pada sebagian besar campuran yang mengandung limbah industri dibandingkan beton kontrol. Campuran dengan substitusi fly ash dan GGBS pada kisaran 20% menunjukkan peningkatan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari. Peningkatan ini disebabkan oleh reaksi pozzolanik yang menghasilkan kalsium silikat hidrat tambahan, sehingga memperpadat struktur mikro beton.

Campuran dengan waste glass powder juga menunjukkan peningkatan kuat tekan yang konsisten hingga batas substitusi tertentu. Pada kadar optimal, partikel halus dari limbah kaca berperan sebagai filler yang mengisi rongga mikro dalam matriks beton, sehingga meningkatkan densitas dan kekuatan tekan. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan peningkatan kuat tekan hingga lebih dari 30% pada substitusi optimal waste glass powder (Gomaa et al., 2025).

Namun, pada kadar substitusi yang terlalu tinggi, beberapa campuran menunjukkan penurunan kuat tekan. Hal ini terjadi karena berkurangnya kandungan semen aktif yang diperlukan untuk proses hidrasi optimal. Kondisi ini menunjukkan bahwa terdapat batas optimum dalam penggunaan limbah industri, di mana peningkatan jumlah substitusi tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan (Alkhatib et al., 2020).

Kuat Tarik Belah dan Kuat Lentur

Hasil pengujian kuat tarik belah menunjukkan pola yang serupa dengan kuat tekan, meskipun peningkatannya tidak sebesar kuat tekan. Campuran dengan kombinasi fly ash dan silica fume menunjukkan peningkatan signifikan pada kemampuan beton menahan gaya tarik tidak langsung. Hal ini disebabkan oleh peningkatan ikatan antar partikel dalam matriks beton yang lebih rapat.

Kuat lentur juga menunjukkan peningkatan pada campuran tertentu, terutama yang mengandung copper slag dalam proporsi moderat. Partikel copper slag yang keras memberikan kontribusi terhadap peningkatan ketahanan terhadap deformasi lentur. Namun, pada kadar tinggi, material ini dapat menyebabkan penurunan keuletan beton akibat peningkatan sifat getas.

Hasil ini menunjukkan bahwa limbah industri tidak hanya mempengaruhi kekuatan tekan, tetapi juga mempengaruhi perilaku mekanik beton secara keseluruhan. Kombinasi material yang tepat diperlukan untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan tekan, tarik, dan lentur, terutama untuk aplikasi struktural yang kompleks (Miranda et al., 2024).

Durabilitas Beton

Pengujian durabilitas menunjukkan peningkatan signifikan pada beton berbasis limbah industri dibandingkan beton konvensional. Uji permeabilitas air menunjukkan penurunan tingkat penyerapan air pada campuran dengan fly ash dan GGBS. Hal ini menunjukkan bahwa struktur pori beton menjadi lebih rapat akibat reaksi pozzolanik jangka panjang.

Uji penetrasi klorida juga menunjukkan hasil yang lebih baik pada beton dengan substitusi limbah industri. Campuran dengan silica fume menunjukkan resistensi tertinggi terhadap penetrasi ion klorida. Partikel ultra-halus dari silica fume mampu mengisi pori mikro sehingga menghambat masuknya ion agresif ke dalam struktur beton.

Selain itu, pengujian ketahanan terhadap larutan asam dan sulfat menunjukkan bahwa beton berbasis limbah industri

memiliki ketahanan lebih tinggi dibandingkan beton kontrol. Fly ash dan GGBS berperan penting dalam menurunkan kadar kalsium hidroksida bebas, sehingga mengurangi reaksi kimia yang merusak struktur beton. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan peningkatan durabilitas pada beton berbasis limbah industri (Disale et al., 2024; Nair et al., 2025).

Analisis Mikrostruktur

Analisis mikrostruktur menunjukkan bahwa beton dengan campuran limbah industri memiliki struktur yang lebih padat dan homogen dibandingkan beton kontrol. Pori-pori mikro berkurang secara signifikan pada campuran dengan kombinasi fly ash, GGBS, dan silica fume. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi hidrasi sekunder terus berlangsung hingga umur beton 28 hari.

Waste glass powder juga berperan sebagai material pengisi yang meningkatkan densifikasi struktur. Namun, pada kadar tinggi, beberapa partikel tidak bereaksi secara kimia sehingga berpotensi menjadi titik lemah dalam struktur beton. Kondisi ini memperkuat pentingnya optimasi komposisi campuran.

Analisis Keberlanjutan

Hasil analisis lingkungan menunjukkan bahwa seluruh campuran berbasis limbah industri memiliki emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Pengurangan terbesar terjadi pada campuran dengan substitusi semen hingga 30%. Hal ini disebabkan oleh penurunan kebutuhan produksi semen Portland yang merupakan sumber utama emisi CO₂.

Analisis konsumsi energi juga menunjukkan pola yang sama, di mana penggunaan limbah industri mampu mengurangi energi yang dibutuhkan dalam proses produksi beton. Fly ash dan GGBS memberikan kontribusi terbesar dalam pengurangan dampak lingkungan karena merupakan produk samping industri yang tidak memerlukan proses produksi tambahan.

Pendekatan Life Cycle Assessment sederhana menunjukkan bahwa beton berbasis limbah industri memiliki potensi signifikan dalam mendukung konstruksi berkelanjutan. Temuan ini konsisten dengan penelitian yang menunjukkan penurunan emisi dan konsumsi energi pada beton hijau (Ranjith & Sekar, 2025; Bakhom & Mater, 2022).

Penentuan Komposisi Optimum

Berdasarkan integrasi hasil pengujian mekanik, durabilitas, dan keberlanjutan, ditemukan bahwa campuran optimal berada pada kisaran substitusi 20% hingga 25% limbah industri gabungan. Pada komposisi ini, beton menunjukkan keseimbangan terbaik antara kuat tekan tinggi, durabilitas optimal, dan dampak lingkungan yang rendah.

Campuran di atas 30% menunjukkan penurunan kekuatan akibat berkurangnya kandungan semen aktif, sedangkan campuran di bawah 10% belum memberikan dampak lingkungan yang signifikan. Oleh karena itu, rentang menengah menjadi pilihan paling efisien untuk aplikasi struktural.

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini konsisten dengan berbagai studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa limbah industri dapat meningkatkan kinerja beton pada batas tertentu. Peningkatan kuat tekan hingga lebih dari 30% juga sejalan dengan hasil penelitian Goma et al. (2025). Selain itu, peningkatan durabilitas dan penurunan permeabilitas juga mendukung temuan Disale et al. (2024) dan Nair et al. (2025).

Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan melalui integrasi multi-material dalam satu sistem campuran serta evaluasi simultan antara aspek mekanik, durabilitas, dan lingkungan. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif dibandingkan penelitian sebelumnya yang cenderung terpisah.

Implikasi Penelitian

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah industri dalam beton tidak hanya layak secara teknis,

tetapi juga memberikan manfaat lingkungan yang signifikan. Implementasi hasil penelitian ini dapat membantu mengurangi ketergantungan terhadap semen Portland serta mendukung pengembangan konstruksi berkelanjutan.

Selain itu, hasil ini juga membuka peluang pengembangan material beton berbasis desain campuran adaptif yang dapat disesuaikan dengan ketersediaan limbah lokal. Pendekatan ini relevan untuk diterapkan di wilayah dengan produksi limbah industri tinggi.

Kesimpulan Pembahasan

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa limbah industri memiliki potensi besar sebagai bahan penyusun beton ramah lingkungan. Peningkatan kinerja mekanik, peningkatan durabilitas, dan penurunan dampak lingkungan dapat dicapai secara bersamaan melalui optimasi komposisi campuran. Namun, keberhasilan ini sangat bergantung pada pemilihan proporsi yang tepat agar tidak mengorbankan integritas struktural beton.

D. Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan beton ramah lingkungan berbasis limbah industri memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kinerja material sekaligus pengurangan dampak lingkungan. Pemanfaatan limbah seperti fly ash, GGBS, silica fume, waste glass powder, dan copper slag mampu menggantikan sebagian semen Portland tanpa menurunkan kualitas beton secara keseluruhan, bahkan pada kondisi tertentu justru meningkatkan performa mekanik dan durabilitas.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton dengan substitusi limbah industri memiliki karakteristik yang lebih unggul dibandingkan beton konvensional pada beberapa aspek utama. Kuat tekan mengalami peningkatan pada variasi campuran tertentu, terutama pada kadar substitusi menengah yang memungkinkan terjadinya reaksi pozzolanik optimal dan pembentukan struktur mikro yang lebih padat. Kuat tarik dan kuat lentur juga menunjukkan peningkatan

meskipun tidak sebesar kuat tekan, dengan performa terbaik diperoleh pada kombinasi material yang seimbang.

Dari sisi durabilitas, beton berbasis limbah industri menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap permeabilitas air, penetrasi klorida, serta serangan lingkungan agresif seperti asam dan sulfat. Struktur beton yang lebih rapat akibat kontribusi partikel halus dan reaksi hidrasi sekunder menjadi faktor utama peningkatan ketahanan tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah industri tidak hanya meningkatkan kekuatan awal, tetapi juga memperpanjang umur layanan struktur beton.

Dari aspek keberlanjutan, penggunaan limbah industri secara signifikan mengurangi kebutuhan semen Portland yang memiliki jejak karbon tinggi. Pengurangan ini berdampak langsung pada penurunan emisi karbon dioksida dan konsumsi energi dalam proses produksi beton. Dengan demikian, beton berbasis limbah industri memiliki potensi besar untuk mendukung pembangunan rendah karbon dan ekonomi sirkular dalam sektor konstruksi.

Penelitian ini juga menemukan bahwa komposisi optimum berada pada rentang substitusi menengah, di mana keseimbangan antara kekuatan, durabilitas, dan keberlanjutan dapat dicapai secara simultan. Substitusi yang terlalu rendah belum memberikan dampak lingkungan yang signifikan, sedangkan substitusi yang terlalu tinggi dapat menurunkan performa mekanik beton.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa pemanfaatan limbah industri dalam beton merupakan solusi yang efektif dan aplikatif untuk meningkatkan kualitas material konstruksi sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan. Pendekatan ini dapat menjadi dasar pengembangan material konstruksi masa depan yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Daftar Pustaka

Akbar, M., Abdou, H., Yosri, A. M., Ullah, W., Badar, J., Ghazouani, N., ... & Elkady, M. (2025). An experimental and statistical investigation into the optimisation of eco-friendly concrete incorporating agricultural and industrial wastes. *Scientific*

- Reports, 15(1), 36119. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-23488-9>
- Alkhatib, A., Maslehuddin, M., & Al-Dulaijan, S. U. (2020). Development of high performance concrete using industrial waste materials and nano-silica. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 6696-6711. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.067>
- Bakhoun, E. S., & Mater, Y. M. (2022). Decision analysis for the influence of incorporating waste materials on green concrete properties. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16(1), 63. <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00553-5>
- Bhede, Y., Bire, S., Girhepuje, H., et al. (2024). Green concrete: Study of a sustainable construction material. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(4), 3554-3557. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.60700>
- Disale, A., Nayak, C., Suryawanshi, N., Jadhav, N., Jagdale, U., Kate, G., ... & Saxena, A. (2024, February). Evaluating properties of green concrete produced using waste marble powder, quarry dust, and paper pulp. In *Macromolecular Symposia*, 413(1), 2300009. <https://doi.org/10.1002/masy.202300009>
- Dyavappanavar, S. P., Kulkarni, D. K., Channagoudar, S., Wali, S., Vijapur, G., Patil, S., ... & Shwetha, G. C. (2024). Enhancing Concrete Performance: Utilizing Industrial Waste GGBFS as an Admixture in Self-Compacting Concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 14(2), 246-251. <https://doi.org/10.2478/jaes-2024-0030>
- Gomaa, A. M., Yasser, A., Mohamed, M., Khaled, A., Lotfy, A., Hamdy, K., ... & Hafez, K. (2025). Enhancing Concrete Performance and Sustainability Using Waste Glass Powder as a Cement Substitute. *Advanced Sciences and Technology Journal*, 2(3), 1-14. <https://doi.org/10.21608/astj.2025.398215.1082>
- Jacob, K. (2025). Exploring the behaviour of sustainable concrete with porcelain tile waste and calcium carbonate. *Kronika Journal*, 25(5), 414-431. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15458804>
- Kumar, P., & Gupta, S. (2025). Concrete as a sustainable matrix for industrial waste fines: effects on water demand, strength, durability, and sustainability. *Journal of Sustainable*

- Cement-Based Materials, 14(12), 2585-2604.
<https://doi.org/10.1080/21650373.2025.2544996>
- Kumar, P., & Kumar, A. (2025). Durability and structural performance of recycled material-based concrete. *AMERICAN Journal of Science on Integration and Human Development*, 3(6), 106-116.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.15669626>
- Manan, A., Zhang, P., Majidi, A., Alattiyih, W., & Ahmad, J. (2025). Utilizing waste materials in concrete: a review on mechanical and sustainable performance. *Green Materials*, 1-18. <https://doi.org/10.1680/jgrma.24.00122>
- Miranda, A., Muñoz, R., Aedo, C., Bustos, F., Tuninetti, V., Valenzuela, M., ... & Oñate, A. (2024). High-performance concrete from rubber and shell waste materials: Experimental and computational analysis. *Materials*, 17(22), 5516. <https://doi.org/10.3390/ma17225516>
- Nagalakshmi, G. (2025). Development of Sustainable and Durable Concrete using Recycled Materials. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, 11(05), 1169–1171. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15510933>
- Nair, S. S., Johny, J., & Joseph, A. (2025). High performance reactive powder concrete using copper slag and pozzolanic materials for eco-efficient construction. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Technology*, 5(4), 125-129.
<https://www.doi.org/10.59256/ijreat.20250504C22>
- Parvez, S., Afsar, S. S., & Rahman, I. (2024). Utilizing different types waste materials used in concrete production in civil construction: A sustainable and environmentally responsible approach. *IEEE*, 12-15.
<https://doi.org/10.1109/ic3se62002.2024.10593531>
- Pitroda, J. R., Prajapati, J. D., & Patel, R. L. (2025). High performance concrete designed using industrial waste: A review. *Indian Scientific Journal of Research in Engineering and Management*, 10(4).
<https://doi.org/10.55041/ijrsrem53109>
- Rai, S., Yadav, P., & Singh, A. (2025). Performance optimization of eco-engineered waterproof concrete blocks using machine learning and industrial by-products. *Discover Civil Engineering*, 2(1), 224. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7278127/v1>
- Ranjith, R., & Sekar, S. K. (2025). Sustainable electrical insulator waste management: An eco-friendly concrete

- development and property assessment using 3E analysis. *Frontiers in Sustainability*, 6. <https://doi.org/10.3389/frsus.2025.1695766>
- Swaroop, A. H. L., Rao, P. K. R., & Pallavi, U. (2025). Eco friendly-efficient M25 concrete: A performance study incorporating industrial and agricultural byproducts for sustainable construction. *NOVYI MIR Research Journal*, 10(7), <https://doi.org/10.5281/zenodo.16485209>
- Wang, L., Zhang, P., Golewski, G., & Guan, J. (2023). Fabrication and properties of concrete containing industrial waste. *Frontiers in materials*, 10, 1169715. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1169715>