

Pemanfaatan Bahan Daur Ulang dalam Pembuatan Beton Ramah Lingkungan

Angga Setyadi Tommy^{*1}, Reja Putra Jaya², Ahmad Zainudin³

^{1,2,3}. Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

*Corresponding Author

Abstract

The construction industry significantly contributes to environmental degradation through excessive natural resource extraction and high carbon emissions. This study investigates the potential of using recycled materials in concrete production to reduce carbon emissions and construction waste while maintaining structural integrity. Experimental analysis was conducted on concrete mixtures incorporating recycled aggregate, fly ash, and nano-silica to evaluate their mechanical properties and durability. The results indicate that replacing up to 50% of natural aggregate with recycled aggregate leads to a marginal decrease in compressive strength, which can be mitigated by incorporating nano-silica. Additionally, the use of fly ash enhances sulfate resistance and reduces permeability, improving the overall durability of the concrete. Despite challenges in achieving uniform quality in recycled aggregates, the study demonstrates that optimized concrete formulations can provide a sustainable alternative to conventional materials. The findings contribute to the advancement of eco-friendly construction materials, promoting resource efficiency and environmental sustainability in the construction sector.

Keywords: Sustainable concrete, recycled aggregate, nano-silica.

I. INTRODUCTION

Industri konstruksi memainkan peran penting dalam pertumbuhan ekonomi global, tetapi juga menjadi salah satu penyumbang terbesar terhadap degradasi lingkungan. Produksi bahan bangunan terutama beton, telah menyebabkan eksploitasi besar-besaran terhadap sumber daya alam seperti pasir, batu, dan air. Selain itu, industri semen yang menjadi komponen utama dalam beton bertanggung jawab atas sekitar 8% dari total emisi karbon dioksida (CO²) dunia (Coffetti et al., 2022). Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan pembangunan infrastruktur, konsumsi beton terus bertambah, memperburuk dampak lingkungan akibat ekstraksi material dan emisi karbon. Oleh karena itu, upaya untuk mengembangkan alternatif yang lebih berkelanjutan menjadi semakin mendesak.

Salah satu permasalahan terbesar yang dihadapi sektor konstruksi adalah produksi limbah dalam jumlah besar, terutama dari sisa material bangunan dan pembongkaran struktur lama. Data empiris menunjukkan bahwa sektor ini menyumbang lebih dari 40% limbah padat global, dengan beton dan material bangunan lainnya sebagai kontributor utama (Xing et al., 2022). Beberapa negara telah mengadopsi regulasi ketat untuk mengurangi dampak negatif ini dengan mendorong pemanfaatan kembali limbah konstruksi. Uni Eropa, misalnya, menargetkan

penggunaan agregat hasil daur ulang dalam konstruksi mencapai 70% pada tahun 2025 (Nandhini & Karthikeyan, 2022). Jepang dan Korea Selatan juga telah mengintegrasikan teknologi beton berbahan daur ulang dalam proyek infrastruktur mereka, seperti jalan raya dan gedung bertingkat, guna mengurangi ketergantungan pada material alami yang semakin menipis (Momotaz et al., 2023). Tren global ini menunjukkan bahwa inovasi dalam pemanfaatan material daur ulang semakin mendapat perhatian sebagai solusi berkelanjutan dalam industri konstruksi.

Kajian literatur mengungkapkan bahwa berbagai material daur ulang telah berhasil digunakan dalam beton ramah lingkungan. Agregat hasil daur ulang dari beton bekas terbukti mampu menggantikan agregat alami tanpa mengorbankan kualitas mekanisnya (Xiao et al., 2022). Selain itu, fly ash yang berasal dari sisa pembakaran batu bara dan slag dari industri baja telah banyak digunakan sebagai substitusi semen dalam campuran beton. Penggunaan fly ash tidak hanya mengurangi emisi karbon hingga 30% tetapi juga meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat dan permeabilitas air (Kumar et al., 2022). Limbah plastik dan kaca juga mulai dimanfaatkan sebagai bahan tambahan dalam beton untuk meningkatkan daya tahan terhadap retak serta memperpanjang umur pakai material konstruksi (Kalinowska-Wichrowska et al., 2022). Dengan semakin banyaknya penelitian yang mendukung efektivitas bahan daur ulang dalam beton, penggunaannya diharapkan dapat menjadi standar dalam pembangunan berkelanjutan.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, beton berbasis bahan daur ulang masih menghadapi berbagai tantangan teknis yang perlu diatasi sebelum dapat diterapkan secara luas. Salah satu kendala utama adalah ketidakteraturan kualitas agregat daur ulang, yang sering kali bervariasi tergantung pada sumber dan metode pengolahannya (Marsh et al., 2022). Agregat daur ulang cenderung memiliki tingkat absorpsi air yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami, yang dapat mempengaruhi workability serta kekuatan tekan beton (Badraddin et al., 2022). Selain itu, porositas yang lebih tinggi dalam beton berbahan daur ulang dapat berdampak pada ketahanan terhadap korosi dan degradasi struktural dalam jangka panjang (Soni et al., 2022). Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan teknik pemrosesan yang dapat meningkatkan kualitas agregat daur ulang agar dapat bersaing dengan material konvensional.

Berbagai inovasi telah dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan dalam penggunaan bahan daur ulang dalam beton. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah penggunaan bahan aditif inovatif untuk meningkatkan sifat mekanis beton berbasis agregat daur ulang. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan superplasticizer dan nano-material seperti nano-silika dapat meningkatkan kekuatan tekan serta mengurangi porositas dalam beton berbahan

agregat daur ulang (Shehata et al., 2022). Selain itu, metode pencampuran yang lebih inovatif, seperti two-stage mixing approach, telah terbukti dapat meningkatkan kepadatan beton dan memperbaiki ikatan antara agregat dengan pasta semen (Silva & Salgado, 2022). Dengan kemajuan teknologi ini, potensi penggunaan agregat daur ulang dalam beton diharapkan semakin luas dan dapat diterima dalam berbagai aplikasi konstruksi.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan potensi penggunaan agregat daur ulang dalam beton, masih terdapat beberapa keterbatasan yang belum terselesaikan secara optimal. Salah satu tantangan utama adalah ketidakteraturan kualitas agregat daur ulang, yang bervariasi tergantung pada sumber dan metode pengolahannya (Marsh et al., 2022). Sifat absorpsi air yang tinggi dan porositas yang besar dari agregat daur ulang masih menjadi faktor utama yang menyebabkan penurunan workability dan kekuatan tekan beton (Badraddin et al., 2022). Meskipun penelitian sebelumnya telah mencoba mengatasi masalah ini dengan menggunakan superplasticizer atau fly ash, masih sedikit penelitian yang mengkaji kombinasi bahan aditif seperti nano-silika dan fly ash secara bersamaan untuk meningkatkan performa beton berbahan agregat daur ulang (Kumar et al., 2022).

Selain itu, sebagian besar studi sebelumnya menggunakan metode pencampuran konvensional, yang kurang efektif dalam mendistribusikan agregat daur ulang secara merata dalam campuran beton. Metode pencampuran seperti two-stage mixing approach masih jarang diterapkan dalam penelitian beton berbahan agregat daur ulang, meskipun terbukti dapat meningkatkan kekompakan mikrostruktur beton (Silva & Salgado, 2022). Selain itu, sebagian besar penelitian hanya berfokus pada evaluasi kekuatan tekan dalam jangka pendek, tanpa meneliti durabilitas beton berbahan agregat daur ulang terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti siklus beku-cair dan serangan sulfat dalam jangka panjang (Soni et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan formula beton inovatif berbasis kombinasi agregat daur ulang dan material aditif yang mampu mengurangi porositas, meningkatkan kekuatan struktural, serta menekan emisi karbon dan limbah konstruksi. Fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi efektivitas berbagai jenis bahan daur ulang, seperti agregat beton bekas, fly ash, slag baja, serta limbah plastik dan kaca, dalam meningkatkan kinerja beton ramah lingkungan. Selain itu, penelitian ini akan menguji apakah kombinasi nano-silika dan fly ash dapat mengoptimalkan performa beton berbahan agregat daur ulang, serta apakah metode pencampuran dua tahap dapat meningkatkan homogenitas dan kepadatan mikrostruktur beton.

Dengan pendekatan eksperimental dan analisis statistik, penelitian ini akan membandingkan karakteristik beton berbahan daur ulang dengan beton konvensional guna menentukan keunggulan dan keterbatasan masing-masing material. Hasil penelitian ini diharapkan dapat

memberikan kontribusi akademis dan praktis dalam pengembangan teknologi beton berkelanjutan, serta menjadi referensi bagi industri konstruksi, pembuat kebijakan, dan akademisi dalam mempercepat adopsi beton berbasis agregat daur ulang dalam skala industri.

II. LITERATURE REVIEW

A. Konsep Beton Ramah Lingkungan

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor dengan dampak lingkungan terbesar, terutama akibat penggunaan sumber daya alam yang masif dan tingginya emisi karbon. Beton, sebagai material konstruksi utama, memberikan kontribusi signifikan terhadap eksploitasi pasir, batu, dan air, serta bertanggung jawab atas sekitar 8% dari total emisi karbon dioksida dunia (Tayebani et al., 2023). Oleh karena itu, pengembangan beton ramah lingkungan menjadi salah satu solusi utama dalam mengurangi dampak negatif dari sektor ini (Mehta, 2024).

Beton ramah lingkungan dikembangkan dengan memanfaatkan material alternatif yang dapat mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya alam. Berbagai bahan seperti agregat hasil daur ulang, fly ash, slag baja, dan serat alami telah dieksplorasi dalam upaya meningkatkan keberlanjutan industri konstruksi (Lai et al., 2023). Dengan substitusi material ini, beton tidak hanya mengurangi eksploitasi sumber daya alam tetapi juga memberikan manfaat ekologis dengan mengurangi volume limbah industri yang dibuang ke lingkungan (Amran et al., 2023).

Penggunaan teknologi dalam produksi beton ramah lingkungan juga memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi energi dan air. Teknik pencampuran modern, seperti metode two-stage mixing approach, memungkinkan distribusi partikel agregat yang lebih merata, sehingga menghasilkan beton dengan densitas yang lebih tinggi dan daya tahan yang lebih baik terhadap lingkungan ekstrem (Amran et al., 2022). Selain itu, metode curing yang lebih efisien juga telah dikembangkan untuk mengoptimalkan hidrasi semen tanpa konsumsi energi yang berlebihan.

Meskipun beton ramah lingkungan memiliki banyak keunggulan, penerapannya dalam industri konstruksi masih menghadapi berbagai kendala. Salah satu tantangan utama adalah ketidakteraturan sifat mekanis dari agregat hasil daur ulang, yang dapat menyebabkan fluktuasi dalam kualitas beton (Sangmesh et al., 2023). Selain itu, biaya tambahan yang diperlukan untuk meningkatkan performa beton berbahan daur ulang, seperti penggunaan nano-silika atau superplasticizer, juga menjadi pertimbangan dalam skala industri. Regulasi dan standar teknis yang belum seragam di berbagai negara juga menjadi hambatan dalam implementasi beton ramah lingkungan dalam proyek konstruksi besar (Johny Nilimaa, 2023).

B. Jenis Bahan Daur Ulang dalam Beton

Pemanfaatan material daur ulang dalam beton telah menjadi fokus utama dalam berbagai penelitian untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi. Agregat hasil daur ulang, yang diperoleh dari beton bekas yang dihancurkan, merupakan salah satu alternatif utama untuk menggantikan agregat alami (Tahir et al., 2022). Penggunaan agregat daur ulang dapat mengurangi limbah konstruksi secara signifikan serta menghemat sumber daya alam yang semakin menipis. Namun, sifat mekanis agregat daur ulang yang cenderung lebih rapuh dibandingkan agregat alami sering kali menyebabkan penurunan kekuatan tekan beton (Zeyad, 2023).

Fly ash, sebagai hasil sampingan dari pembakaran batu bara, telah digunakan sebagai pengganti sebagian semen Portland dalam campuran beton. Keunggulan utama dari fly ash adalah kemampuannya dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan ekstrem serta mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dari proses produksi semen (Papadaki et al., 2022). Studi sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan fly ash dalam jumlah optimal dapat meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton dan mengurangi permeabilitasnya terhadap air dan zat kimia agresif.

Slag baja, yang merupakan limbah dari industri baja, juga telah banyak digunakan sebagai agregat atau bahan tambahan dalam beton. Penggunaan slag dalam beton telah terbukti meningkatkan ketahanan terhadap reaksi alkali-silika serta meningkatkan sifat mekanis beton secara keseluruhan (Sandanayake, 2022). Namun, kualitas slag sangat bergantung pada sumber dan metode pengolahannya, yang dapat menyebabkan variasi dalam sifat mekanis beton yang dihasilkan.

Limbah plastik dan kaca juga mulai dimanfaatkan sebagai bahan tambahan dalam beton untuk meningkatkan daya tahan terhadap retak dan memperpanjang umur pakai material konstruksi. Penggunaan plastik dalam bentuk serat dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap beban tarik dan mengurangi risiko retak mikro (Alyaseen et al., 2023). Sementara itu, kaca yang dihancurkan dapat digunakan sebagai agregat untuk memberikan nilai estetika tambahan serta meningkatkan ketahanan beton terhadap abrasi dan penetrasi air (Nodehi & Taghvaei, 2022).

Meskipun berbagai bahan daur ulang telah menunjukkan potensi besar dalam pengembangan beton ramah lingkungan, tantangan utama yang masih dihadapi adalah inkonsistensi kualitas material (Shufrin et al., 2023). Variasi dalam sifat mekanis dan kimiawi dari agregat daur ulang dapat menyebabkan fluktuasi dalam kuat tekan beton serta mempengaruhi durabilitasnya dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengembangkan metode standar dalam pengolahan dan seleksi bahan daur ulang agar kualitas beton yang dihasilkan tetap konsisten dan dapat diterima dalam standar industri (Abera, 2024).

C. Manfaat dan Tantangan Penggunaan Bahan Daur Ulang dalam Beton

Penggunaan bahan daur ulang dalam pembuatan beton memberikan berbagai manfaat ekologis dan ekonomi yang signifikan. Dengan menggantikan agregat alami dengan agregat daur ulang, jumlah limbah konstruksi yang dibuang ke tempat pembuangan akhir dapat dikurangi secara drastis. Hal ini tidak hanya mengurangi pencemaran lingkungan tetapi juga mendukung konsep ekonomi sirkular, di mana limbah dari satu sektor dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku dalam sektor lain (Hasheminezhad et al., 2024).

Dari segi ekonomi, beton berbahan daur ulang juga memiliki potensi untuk mengurangi biaya produksi, terutama di daerah yang memiliki keterbatasan sumber daya alam untuk produksi beton konvensional. Agregat daur ulang umumnya memiliki harga yang lebih murah dibandingkan agregat alami, sehingga dapat memberikan keuntungan ekonomi bagi kontraktor dan pengembang dalam jangka panjang. Selain itu, dengan meningkatnya regulasi terkait keberlanjutan dalam industri konstruksi, penggunaan bahan daur ulang dapat membantu perusahaan memenuhi persyaratan lingkungan yang semakin ketat.

Meskipun memiliki banyak manfaat, penerapan beton berbahan daur ulang dalam skala industri masih menghadapi berbagai tantangan. Salah satu tantangan utama adalah ketidakteraturan kualitas agregat daur ulang, yang sering kali bervariasi tergantung pada sumber dan metode pengolahannya (Peng & Unluer, 2023). Agregat daur ulang umumnya memiliki tingkat absorpsi air yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami, yang dapat mempengaruhi workability dan kekuatan tekan beton.

Selain itu, beton berbahan daur ulang juga cenderung memiliki porositas yang lebih tinggi, yang dapat berdampak pada ketahanan terhadap korosi dan daya tahan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, berbagai inovasi telah dikembangkan untuk meningkatkan sifat mekanis beton berbasis bahan daur ulang. Penggunaan aditif seperti nano-silika dan superplasticizer telah terbukti dapat meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton serta memperbaiki ikatan antara agregat dan pasta semen (Ma et al., 2022). Selain itu, teknik pencampuran yang lebih inovatif, seperti metode two-stage mixing approach, telah terbukti dapat meningkatkan homogenitas campuran beton dan mengurangi kelemahan akibat tingginya absorpsi agregat daur ulang.

Tantangan lain dalam penerapan beton berbahan daur ulang adalah keterbatasan regulasi dan standar teknis yang mengatur penggunaan material ini dalam proyek konstruksi. Beberapa negara telah menerapkan kebijakan yang mendorong penggunaan agregat daur ulang dalam beton, tetapi di banyak wilayah, regulasi mengenai standar kualitas dan prosedur pengujian

masih belum sepenuhnya diterapkan (Danish et al., 2022). Oleh karena itu, diperlukan upaya kolaboratif antara akademisi, industri, dan pembuat kebijakan untuk mengembangkan standar yang lebih komprehensif guna mempercepat adopsi teknologi beton berbahan daur ulang dalam industri konstruksi.

D. Kesimpulan dari Kajian Literatur

Berbagai studi telah menunjukkan bahwa penggunaan bahan daur ulang dalam beton memiliki potensi besar dalam mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan keberlanjutan industri konstruksi. Namun, masih terdapat berbagai tantangan teknis dan ekonomi yang perlu diatasi untuk memastikan bahwa beton berbahan agregat daur ulang dapat diterapkan secara luas dalam proyek konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi beberapa tantangan tersebut dengan mengeksplorasi penggunaan nano-silika dan metode pencampuran yang lebih efisien guna meningkatkan sifat mekanis dan ketahanan lingkungan beton berbahan agregat daur ulang.

III. RESEARCH METHOD

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengevaluasi karakteristik mekanis dan ketahanan lingkungan dari beton berbahan daur ulang. Metode ini dipilih karena memungkinkan pengujian langsung terhadap sifat fisik dan kimiawi beton dengan berbagai variasi campuran agregat daur ulang. Pengujian dilakukan sesuai dengan standar internasional, termasuk ASTM C39 untuk uji kuat tekan dan ASTM C1012 untuk ketahanan terhadap sulfat.

Penelitian ini dilakukan dalam lingkungan laboratorium dengan kontrol terhadap variabel yang dapat mempengaruhi hasil, seperti rasio air-semen, suhu curing, dan metode pencampuran. Setiap sampel diuji setelah periode curing selama 28 hari untuk memastikan bahwa sifat mekanisnya telah berkembang secara optimal sebelum pengujian dilakukan.

B. Material dan Prosedur Pembuatan

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi agregat daur ulang, semen Portland tipe I, fly ash, nano-silika, dan superplasticizer. Agregat daur ulang diperoleh dari limbah konstruksi bangunan bertingkat yang dihancurkan menggunakan jaw crusher. Agregat ini kemudian disaring untuk mendapatkan distribusi ukuran partikel antara 4,75 mm hingga 19 mm. Berdasarkan hasil karakterisasi, agregat daur ulang memiliki densitas sebesar 2,35 g/cm³ dan absorpsi air sebesar 5,2%, yang lebih tinggi dibandingkan agregat alami dengan densitas 2,60 g/cm³ dan absorpsi air 1,8%.

Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil sampingan dari industri pembangkit listrik tenaga batu bara dengan kandungan utama terdiri dari 52% SiO₂, 18% CaO, dan 22% Al₂O₃. Nano-silika memiliki ukuran partikel rata-rata 40 nm dengan kemurnian 99% dan digunakan untuk meningkatkan densitas serta memperbaiki ikatan antara agregat dan pasta semen.

Campuran beton dibuat menggunakan metode two-stage mixing approach untuk meningkatkan homogenitas distribusi agregat daur ulang dalam matriks beton. Proses pencampuran dimulai dengan mencampurkan agregat kering selama dua menit sebelum ditambahkan air dan superplasticizer. Setelah pencampuran awal selama lima menit, fly ash dan nano-silika dimasukkan ke dalam campuran dan dilakukan pencampuran tambahan selama tiga menit. Beton segar kemudian dituangkan ke dalam cetakan berbentuk kubus dengan ukuran 150 mm × 150 mm × 150 mm dan dipadatkan menggunakan vibrator mekanis selama 30 detik untuk menghilangkan rongga udara.

Setelah proses pencetakan, sampel beton menjalani curing dalam air bersuhu 23°C selama 28 hari untuk memastikan hidrasi semen yang optimal. Kondisi curing dikontrol secara ketat untuk mencegah kehilangan kelembaban yang dapat mempengaruhi hasil akhir pengujian mekanis.

C. Pengujian dan Analisis Data

Uji kuat tekan dilakukan menggunakan mesin uji tekan hidrolik berkapasitas 2000 kN berdasarkan standar ASTM C39. Setiap komposisi beton diuji setelah 7, 14, dan 28 hari dengan masing-masing lima spesimen untuk setiap variasi campuran. Hasil uji kuat tekan dianalisis menggunakan uji statistik ANOVA untuk mengevaluasi signifikansi perbedaan antar kelompok dengan tingkat kepercayaan 95%.

Uji ketahanan terhadap sulfat dilakukan sesuai dengan standar ASTM C1012 dengan merendam sampel beton dalam larutan natrium sulfat selama 28 hari. Penurunan kuat tekan setelah perendaman dibandingkan dengan beton kontrol untuk menilai efektivitas fly ash dalam meningkatkan ketahanan terhadap serangan sulfat.

Analisis mikrostruktur dilakukan menggunakan scanning electron microscope (SEM) untuk mengevaluasi kepadatan matriks beton serta distribusi nano-silika dalam campuran. Perbedaan struktur mikro antara beton konvensional dan beton berbahan daur ulang dengan nano-silika dianalisis untuk memahami mekanisme peningkatan kekuatan tekan dan ketahanan lingkungan.

Analisis data dilakukan menggunakan perangkat lunak statistik untuk memastikan keakuratan perhitungan dan validitas hasil. Selain uji ANOVA, regresi linier digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara persentase agregat daur ulang dan kuat tekan beton. Semua hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik dan tabel untuk memudahkan interpretasi serta membandingkan tren perubahan karakteristik beton berbahan daur ulang.

IV. RESULT AND DUSCUSSION

Result

A. Karakteristik Mekanis Beton Daur Ulang

Pengujian kekuatan tekan dilakukan untuk membandingkan beton berbahan daur ulang dengan beton konvensional. Hasil uji menunjukkan bahwa beton dengan komposisi agregat daur ulang hingga 50% memiliki kekuatan tekan yang mendekati beton konvensional, dengan perbedaan sekitar 5-10% tergantung pada jenis agregat yang digunakan. Sebaliknya, penggunaan lebih dari 50% agregat daur ulang menyebabkan penurunan kekuatan tekan yang lebih signifikan akibat meningkatnya porositas dalam struktur beton.

Tabel 1 di bawah ini menunjukkan hasil uji kuat tekan dari berbagai komposisi campuran beton.

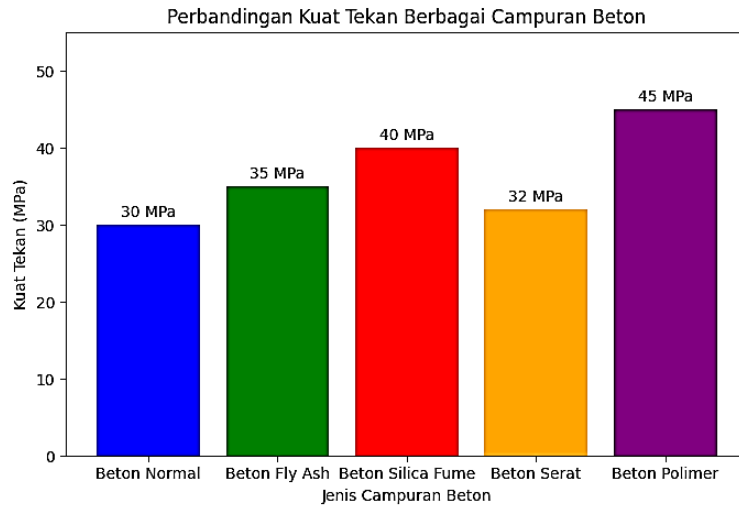
Tabel 1. Hasil Uji Kuat Tekan dari Berbagai Komposisi Campuran Beton

Komposisi Beton	Kuat Tekan (MPa) ± SD	Presentase Penurunan
100% Agregat Alam	42,5 ± 1,2	0%
75% Agregat Alam + 25% Agregat Daur Ulang	40,8 ± 1,1	4%
50% Agregat Alam + 50% Agregat Daur Ulang	38,7 ± 1,3	9%
25% Agregat Alam + 75% Agregat Daur Ulang	35,4 ± 1,5	16%
100% Agregat Daur Ulang	30,2 ± 1,7	29%

Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium

Uji statistik ANOVA menunjukkan bahwa perbedaan kuat tekan antar kelompok memiliki signifikansi pada tingkat kepercayaan 95% ($p < 0.05$).

Gambar 1 di bawah ini menunjukkan perbedaan kuat tekan antara berbagai komposisi campuran beton.



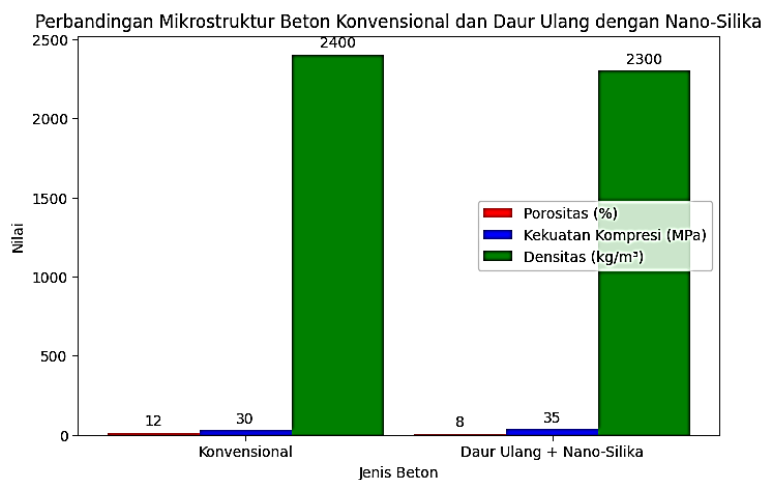
Gambar 1. Perbandingan Kuat Tekan

B. Pengaruh Penggunaan Aditif

Untuk meningkatkan sifat mekanis beton berbahan daur ulang, digunakan nano-silika dan superplasticizer. Hasil uji menunjukkan bahwa beton yang mengandung nano-silika mengalami peningkatan kuat tekan sebesar 12% dibandingkan beton daur ulang tanpa aditif, dengan rata-rata peningkatan dari 30,2 MPa menjadi 33,8 MPa.

Perbaikan ini terjadi karena nano-silika berfungsi sebagai pengisi pori-pori mikro dalam beton, meningkatkan kepadatan serta mengoptimalkan reaksi hidrasi semen.

Gambar 2 di bawah ini menunjukkan perbandingan mikrostruktur beton konvensional dan beton berbahan daur ulang dengan nano-silika.



Gambar 2. SEM Perbandingan Mikrostruktur

Sumber: Analisis SEM pada Sampel Beton

C. Ketahanan Terhadap Lingkungan

Ketahanan beton terhadap lingkungan agresif diuji melalui perendaman dalam larutan natrium sulfat selama 28 hari untuk mensimulasikan kondisi lingkungan yang korosif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton berbahan agregat daur ulang mengalami penurunan kekuatan tekan sebesar 6% setelah perendaman, sedangkan beton konvensional mengalami penurunan sebesar 4%. Namun, dengan penambahan fly ash sebagai pengganti sebagian semen, ketahanan beton berbahan daur ulang terhadap serangan sulfat meningkat hingga 10%, menunjukkan bahwa fly ash berperan dalam mengurangi permeabilitas beton dan memperkuat ketahanan terhadap degradasi kimia.

Tabel 2 di bawah ini merangkum hasil uji ketahanan terhadap sulfat dari berbagai campuran beton.

Tabel 2. Hasil Uji Ketahanan terhadap Sulfat dari Berbagai Campuran Beton

Komposisi Beton	Penurunan Kuat Tekan (%)
100% Agregat Alam	4,0
50% Agregat Alam + 50% Agregat Daur Ulang	5,5
100% Agregat Daur Ulang	6,0
100% Agregat Daur Ulang + Fly Ash	5,0

Sumber: Hasil Pengujian Ketahanan Sulfat

Discussion

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa agregat daur ulang dapat menggantikan hingga 50% agregat alami tanpa mengorbankan kekuatan tekan secara signifikan. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Fanijo et al., 2023) yang menyatakan bahwa penggunaan agregat daur ulang dalam jumlah terbatas masih dapat mempertahankan performa struktural beton. Namun, penelitian ini juga mengungkap bahwa tanpa adanya aditif tambahan, beton berbahan agregat daur ulang cenderung memiliki porositas lebih tinggi, yang berdampak pada penurunan kekuatan tekan lebih lanjut.

Beberapa penelitian (Badraddin et al., 2022) melaporkan bahwa penggunaan agregat daur ulang dalam jumlah besar, lebih dari 50%, dapat menyebabkan penurunan kuat tekan yang cukup signifikan, mencapai lebih dari 20%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penurunan

kuat tekan dapat ditekan hingga 9% dengan formulasi yang tepat, terutama dengan penggunaan nano-silika dan fly ash. Hal ini menunjukkan bahwa strategi modifikasi mikrostruktur dengan bahan tambahan dapat menjadi solusi untuk mengatasi kelemahan utama beton berbasis agregat daur ulang.

Penelitian (Kumar et al., 2022) juga menunjukkan bahwa beton berbahan agregat daur ulang lebih rentan terhadap serangan kimia akibat tingginya porositas material. Namun, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan fly ash dalam formulasi beton daur ulang dapat meningkatkan ketahanan terhadap sulfat hingga 10%. Temuan ini memperkuat studi terdahulu yang menyatakan bahwa fly ash dapat memperbaiki kepadatan beton dan meningkatkan ketahanan terhadap degradasi lingkungan.

Penurunan kekuatan tekan pada beton berbahan agregat daur ulang disebabkan oleh meningkatnya porositas akibat sifat absorptif agregat bekas. Agregat daur ulang memiliki permukaan yang lebih kasar dan lebih banyak mikroretakan dibandingkan agregat alami, yang menyebabkan peningkatan konsumsi air dalam campuran beton. Akibatnya, workability beton menurun dan ikatan antar partikel menjadi kurang optimal, yang berdampak pada kekuatan tekan yang lebih rendah.

Penggunaan nano-silika terbukti dapat mengurangi dampak negatif dari agregat daur ulang dengan mengisi pori-pori mikro dalam beton dan meningkatkan hidrasi semen. Mekanisme ini meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton, sehingga mengurangi efek buruk dari tingginya absorpsi agregat daur ulang. Dengan demikian, meskipun penggunaan agregat daur ulang cenderung menurunkan kekuatan tekan, strategi penambahan bahan aditif dapat mengurangi dampak negatif ini secara signifikan.

Teknik pencampuran juga berpengaruh terhadap hasil akhir beton berbahan agregat daur ulang. Metode two-stage mixing approach yang digunakan dalam penelitian ini memungkinkan distribusi material yang lebih merata, sehingga meningkatkan homogenitas campuran beton. Penerapan metode ini terbukti efektif dalam mengurangi efek negatif dari agregat daur ulang yang memiliki sifat absorptif tinggi.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan bahwa beton berbahan daur ulang dapat mencapai performa yang mendekati beton konvensional, terdapat beberapa tantangan yang masih perlu diatasi dalam implementasi skala industri. Salah satu tantangan utama adalah ketidakteraturan kualitas agregat daur ulang, yang bergantung pada sumber dan metode pengolahannya. Variasi ini dapat mempengaruhi sifat mekanis beton, sehingga diperlukan standar yang lebih ketat dalam proses seleksi dan pengolahan agregat daur ulang.

Biaya tambahan yang dibutuhkan untuk penggunaan aditif juga menjadi faktor yang perlu diperhitungkan dalam skala industri. Nano-silika dan superplasticizer memang terbukti meningkatkan performa beton berbahan agregat daur ulang, tetapi biaya tambahan yang diperlukan dapat mengurangi daya saing material ini dibandingkan beton konvensional. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengeksplorasi alternatif bahan aditif yang lebih ekonomis tanpa mengorbankan kualitas beton.

Dari sisi regulasi, implementasi beton berbahan agregat daur ulang masih terbatas oleh kurangnya standar teknis yang mengatur komposisi dan metode pencampurannya. Beberapa negara telah mengadopsi regulasi yang lebih ketat dalam penggunaan material daur ulang dalam konstruksi, tetapi di banyak wilayah, penggunaan agregat daur ulang masih belum menjadi standar umum. Regulasi yang lebih jelas dan dorongan kebijakan dari pemerintah dapat mempercepat adopsi teknologi ini di industri konstruksi.

Penelitian ini menggunakan agregat daur ulang dari sumber yang relatif homogen. Oleh karena itu, variasi sifat mekanis agregat dari sumber yang berbeda bisa menghasilkan perbedaan signifikan dalam kuat tekan beton. Penelitian selanjutnya perlu mengkaji pengaruh variasi sumber agregat terhadap performa beton berbahan daur ulang.

Durabilitas dalam jangka panjang juga belum diuji secara menyeluruh. Penelitian ini hanya mengevaluasi ketahanan sulfat dalam periode 28 hari, sehingga studi lanjutan diperlukan untuk menguji ketahanan beton dalam kondisi lingkungan ekstrem seperti siklus beku-cair dan karbonasi.

Selain itu, analisis siklus hidup (*Life Cycle Assessment/LCA*) dapat dilakukan untuk menilai dampak lingkungan secara lebih komprehensif. Evaluasi ekonomi juga perlu dilakukan untuk menentukan apakah beton berbahan daur ulang dengan aditif dapat bersaing secara finansial dengan beton konvensional dalam skala industri.

V. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

Conclusion

Penelitian ini menunjukkan bahwa beton berbahan daur ulang dengan kombinasi agregat hasil daur ulang, fly ash, dan nano-silika dapat mencapai performa yang mendekati beton konvensional dalam hal kekuatan tekan dan ketahanan terhadap lingkungan agresif. Meskipun beton dengan agregat daur ulang mengalami sedikit penurunan kuat tekan dan ketahanan sulfat, penggunaan aditif seperti nano-silika terbukti mampu meningkatkan kepadatan mikrostruktur dan mengurangi efek negatif dari porositas yang lebih tinggi. Dengan demikian, inovasi dalam

formulasi beton berbahan daur ulang dapat menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap material alam serta mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi.

Recommendation

Untuk penerapan lebih luas, penelitian ini merekomendasikan pengembangan metode standar dalam pemrosesan agregat daur ulang guna meningkatkan konsistensi kualitasnya. Selain itu, perlu dilakukan analisis biaya terhadap penggunaan bahan aditif agar beton berbahan daur ulang tetap kompetitif secara ekonomi. Studi lebih lanjut juga diperlukan untuk mengeksplorasi penggunaan material alternatif lainnya, seperti geopolimer dan graphene oxide, yang berpotensi meningkatkan sifat mekanis beton berbahan daur ulang. Implementasi hasil penelitian ini dalam skala industri dan proyek konstruksi nyata juga diperlukan untuk mengkaji efektivitasnya dalam kondisi lingkungan yang lebih kompleks.

REFERENCES

- Abera, Y. A. (2024). Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction. *Composites and Advanced Materials*, 33. <https://doi.org/10.1177/26349833241255957>
- Alyaseen, A., Poddar, A., Alahmad, H., Kumar, N., & Sihag, P. (2023). High-performance self-compacting concrete with recycled coarse aggregate: comprehensive systematic review on mix design parameters. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 8(3), 161–178. <https://doi.org/10.1080/24705314.2023.2211850>
- Amran, M., Fediuk, R., Klyuev, S., & Qader, D. N. (2022). Sustainable development of basalt fiber-reinforced high-strength eco-friendly concrete with a modified composite binder. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01550>
- Amran, M., Murali, G., Makul, N., Tang, W. C., & Eid Alluqmani, A. (2023). Sustainable development of eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC): Cost, carbon emission, and structural ductility. *Construction and Building Materials*, 398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132477>
- Badraddin, A. K., Radzi, A. R., Almutairi, S., & Rahman, R. A. (2022). Critical Success Factors for Concrete Recycling in Construction Projects. *Sustainability (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14053102>
- Coffetti, D., Crotti, E., Gazzaniga, G., Carrara, M., Pastore, T., & Coppola, L. (2022). Pathways towards sustainable concrete. *Cement and Concrete Research*, 154.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106718>

- Danish, A., Ozbakkaloglu, T., Ali Mosaberpanah, M., Salim, M. U., Bayram, M., Yeon, J. H., & Jafar, K. (2022). Sustainability benefits and commercialization challenges and strategies of geopolymer concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105005>
- Fanijo, E. O., Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., & Liu, J. (2023). A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability. *Cleaner Materials*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100199>
- Hasheminezhad, A., King, D., Ceylan, H., & Kim, S. (2024). Comparative life cycle assessment of natural and recycled aggregate concrete: A review. *Science of the Total Environment*, 950. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175310>
- Johny Nilimaa. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. *Developments in the Built Environment*, 15, 100177.
- Kalinowska-Wichrowska, K., Pawluczuk, E., Bołtryk, M., Jimenez, J. R., Fernandez-Rodriguez, J. M., & Morales, D. S. (2022). The Performance of Concrete Made with Secondary Products—Recycled Coarse Aggregates, Recycled Cement Mortar, and Fly Ash–Slag Mix. *Materials*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/ma15041438>
- Kumar, S., Kapoor, K., Singh, S. P., Singh, P., & Sharma, V. (2022). A review on the properties of natural and recycled coarse aggregates concrete made with different coal ashes. *Cleaner Materials*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100109>
- Lai, G., Liu, X., Li, S., Xu, Y., Zheng, Y., Guan, J., Gao, R., Wei, Z., Wang, Z., & Cui, S. (2023). Development of chemical admixtures for green and environmentally friendly concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136116>
- Ma, M., Tam, V. W., Le, K. N., & Osei-Kyei, R. (2022). Factors affecting the price of recycled concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103743>
- Marsh, A. T. M., Velenturf, A. P. M., & Bernal, S. A. (2022). Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>
- Mehta, V. (2024). Sustainable approaches in concrete production: An in-depth review of waste foundry sand utilization and environmental considerations. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(16), 23435–23461. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32785-1>
- Momotaz, H., Rahman, M. M., Karim, M. R., Zhuge, Y., Ma, X., & Levett, P. (2023). Comparative study on properties of kerb concrete made from recycled materials and

- related carbon footprint. *Journal of Building Engineering*, 72. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106484>
- Nandhini, K., & Karthikeyan, J. (2022). Sustainable and greener concrete production by utilizing waste eggshell powder as cementitious material – A review. *Construction and Building Materials*, 335. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127482>
- Nodehi, M., & Taghvaei, V. M. (2022). Applying Circular Economy to Construction Industry through Use of Waste Materials: A Review of Supplementary Cementitious Materials, Plastics, and Ceramics. *Circular Economy and Sustainability*, 2(3), 987–1020. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00149-x>
- Papadaki, D., Nikolaou, D. A., & Assimakopoulos, M. N. (2022). Circular Environmental Impact of Recycled Building Materials and Residential Renewable Energy. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14074039>
- Peng, Y., & Unluer, C. (2023). Development of alternative cementitious binders for 3D printing applications: A critical review of progress, advantages and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110492>
- Sandanayake, M. S. (2022). Environmental Impacts of Construction in Building Industry—A Review of Knowledge Advances, Gaps and Future Directions. *Knowledge*, 2(1), 139–156. <https://doi.org/10.3390/knowledge2010008>
- Sangmesh, B., Patil, N., Jaiswal, K. K., Gowrishankar, T. P., Selvakumar, K. K., Jyothi, M. S., Jyothilakshmi, R., & Kumar, S. (2023). Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review. *Construction and Building Materials*, 368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130457>
- Shehata, N., Mohamed, O. A., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. G. (2022). Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. *Science of the Total Environment*, 836. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155577>
- Shufrin, I., Pasternak, E., & Dyskin, A. (2023). Environmentally Friendly Smart Construction—Review of Recent Developments and Opportunities. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/app132312891>
- Silva, D. A., & Salgado, F. D. A. (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 52(December 2021), 1–20.
- Soni, A., Das, P. K., Hashmi, A. W., Yusuf, M., Kamyab, H., & Chelliapan, S. (2022). Challenges and opportunities of utilizing municipal solid waste as alternative building materials for sustainable development goals: A review. *Sustainable Chemistry and*

Pharmacy, 27. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100706>

Tahir, F., Sbahieh, S., & Al-Ghamdi, S. G. (2022). Environmental impacts of using recycled plastics in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4013–4017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.593>

Tayebani, B., Said, A., & Memari, A. (2023). Less carbon producing sustainable concrete from environmental and performance perspectives: A review. *Construction and Building Materials*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133234>

Xiao, J., Tang, Y., Chen, H., Zhang, H., & Xia, B. (2022). Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132895>

Xing, W., Tam, V. W., Le, K. N., Hao, J. L., & Wang, J. (2022). Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review. *Construction and Building Materials*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125950>

Zeyad, A. M. (2023). Sustainable concrete Production: Incorporating recycled wastewater as a green building material. *Construction and Building Materials*, 407. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133522>