

Analisis Efisiensi Beton Daur Ulang sebagai Alternatif Agregat pada Konstruksi Berkelanjutan

Muhammad Arrie Rafshanjani Amin^{*1}, Inseun Yuri Salena²

^{1,2}Teknik Sipil, Universitas Teuku Umar, Indonesia
Email: ¹arrierafsanjani@utu.ac.id, ²inseunsalena@utu.ac.id

Abstrak

Permasalahan limbah konstruksi dan tingginya ketergantungan pada agregat alam mendorong penelitian penggunaan beton daur ulang sebagai alternatif material yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi beton daur ulang sebagai pengganti sebagian agregat kasar dalam campuran beton, dengan fokus pada kekuatan tekan dan kuat tarik belah. Metode eksperimen digunakan dengan variasi penggantian limbah beton sebesar 10%, 20%, 30%, dan 40%, serta beton kontrol tanpa limbah beton. Pengujian dilakukan pada umur 7 dan 28 hari untuk kekuatan tekan, serta pada umur 28 hari untuk kuat tarik belah. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan limbah beton hingga 40% menghasilkan kuat tekan yang setara atau melebihi desain kuat tekan 25 MPa, sementara penggantian 10% meningkatkan kuat tarik belah sebesar 1,99%. Namun, penggantian di atas 10% menyebabkan penurunan kuat tarik belah yang signifikan, mencapai 12,8%. Hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik belah menunjukkan korelasi yang lemah ($R=0,63$), yang mengindikasikan adanya pengaruh faktor berbeda. Penelitian ini memberikan wawasan penting tentang potensi beton daur ulang sebagai material konstruksi berkelanjutan, dengan implikasi untuk mengurangi limbah konstruksi dan konservasi sumber daya alam. Pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan performa kuat tarik belah dan mendukung penerapan beton daur ulang pada proyek berskala besar.

Kata Kunci: Agregat Kasar, Beton Daur Ulang, Keberlanjutan, Kuat Tarik Belah, Kuat Tekan

Abstract

The problem of construction waste and the high reliance on natural aggregates prompted research into the use of recycled concrete as a sustainable alternative material. This study aims to evaluate the potential of recycled concrete as a partial replacement for coarse aggregate in concrete mixes, with a focus on compressive strength and split tensile strength. An experimental method was used with variations of 10%, 20%, 30%, and 40% waste concrete replacement, as well as a control concrete without waste concrete. Tests were conducted at 7 and 28 days for compressive strength, and at 28 days for split tensile strength. Results showed that the use of concrete waste up to 40% resulted in compressive strengths equivalent to or exceeding the design compressive strength of 25 MPa, while 10% replacement increased the split tensile strength by 1.99%. However, replacement above 10% led to a significant decrease in split tensile strength, reaching 12.8%. The relationship between compressive strength and split tensile strength showed a weak correlation ($R=0.63$), indicating the influence of different factors. This study provides important insights into the potential of recycled concrete as a sustainable construction material, with implications for reducing construction waste and conserving natural resources. Further development is required to improve the split tensile strength performance and support the application of recycled concrete in large-scale projects.

Keywords: Compressive Strength, Recycled Aggregate, Split Tensile Strength, Sustainability, Waste Concrete

1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi merupakan salah satu kontributor terbesar terhadap degradasi lingkungan, dengan produksi beton yang menyumbang sekitar 8% dari emisi karbon dioksida global (Belaid, 2022). Selain itu, industri ini juga menghasilkan limbah konstruksi dan pembongkaran yang signifikan, yang diproyeksikan melebihi 2,2 miliar ton secara global pada tahun 2025 (Dunia, 2021). Tantangan-tantangan ini menyoroti kebutuhan mendesak akan praktik-praktik berkelanjutan, termasuk

penggunaan beton daur ulang. Agregat beton daur ulang (RCA) diproduksi dengan menghancurkan dan memproses beton lama, menawarkan alternatif yang berkelanjutan untuk agregat alami dalam campuran beton baru (Kurad et al., 2017).

Terlepas dari manfaatnya bagi lingkungan, seperti mengurangi limbah dan melestarikan sumber daya alam, penerapan RCA menghadapi tantangan terkait variabilitas kualitas, daya tahan, dan kinerja mekanis (Silva et al., 2015). Studi terbaru menunjukkan bahwa beton yang menggunakan RCA hingga 30% dapat mencapai kekuatan tekan yang sebanding dengan beton konvensional, meskipun kekuatan tariknya mungkin sedikit berkurang (Kurad et al., 2017; Lotfi et al., 2014). Hal ini menyoroti perlunya desain campuran yang dioptimalkan dan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi keterbatasan ini.

Pemanfaatan material daur ulang dalam industri konstruksi, khususnya beton daur ulang (recycled concrete), telah berkembang pesat seiring dengan peningkatan kesadaran terhadap isu-isu lingkungan dan kebutuhan untuk mengurangi dampak negatif pembangunan terhadap alam. Beton merupakan material yang sangat dominan dalam konstruksi, dengan kontribusi besar terhadap konsumsi energi dan emisi karbon global (Cincinelli et al., 2017). Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan beton untuk berbagai proyek infrastruktur, tekanan terhadap sumber daya alam semakin tinggi. Oleh karena itu, beton daur ulang, yang berasal dari penghancuran beton bekas, menawarkan solusi yang menarik untuk mengurangi limbah konstruksi dan menghemat sumber daya alam. Namun, penerapannya pada proyek konstruksi skala besar masih menghadapi berbagai tantangan yang perlu dianalisis lebih mendalam, baik dari segi keberlanjutan sumber daya maupun aspek teknis dan ekonominya.

Beton daur ulang umumnya dihasilkan dengan menggiling beton lama yang sudah tidak digunakan lagi, dan mengolahnya menjadi agregat yang dapat dimanfaatkan kembali dalam campuran beton baru. Proses ini tidak hanya mengurangi limbah konstruksi, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada bahan baku alam seperti pasir dan kerikil yang semakin terbatas (Chikezirim & Mwanaumo, 2013). Selain itu, penggunaan beton daur ulang dianggap dapat mengurangi jejak karbon dari produksi beton, karena mengurangi kebutuhan energi dalam proses produksi agregat baru (Poon, 2007). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa beton daur ulang dapat memiliki kinerja yang setara dengan beton konvensional dalam beberapa aplikasi, meskipun ada beberapa penurunan kekuatan dan durabilitas yang perlu diatasi (Kwan et al., 2006).

Namun, meskipun manfaat ekologis dari penggunaan beton daur ulang telah terbukti, tantangan besar tetap ada dalam penerapannya, terutama pada proyek konstruksi berskala besar. Beton daur ulang sering kali dianggap kurang stabil dalam kualitasnya, terutama terkait dengan ketahanan terhadap tekanan mekanik dan lingkungan (M. Liu et al., 2017). Masalah lainnya adalah ketersediaan beton daur ulang yang berkualitas tinggi, serta kesulitan dalam proses pencampuran yang dapat mempengaruhi kinerja material dalam proyek jangka panjang. Oleh karena itu, untuk mengimplementasikan beton daur ulang pada proyek konstruksi skala besar secara berkelanjutan, diperlukan analisis mendalam terhadap sumber daya yang tersedia, proses produksi, dan dampak lingkungan yang ditimbulkan.

Sebagai upaya untuk mendorong penggunaan beton daur ulang secara lebih luas, banyak negara mulai menerapkan regulasi yang mendukung keberlanjutan dalam industri konstruksi. Misalnya, Uni Eropa dan beberapa negara maju telah memperkenalkan kebijakan yang mengharuskan penggunaan material daur ulang dalam proyek konstruksi pemerintah (Commission, 2018). Selain itu, dalam beberapa tahun terakhir, terdapat juga kemajuan dalam teknologi pengolahan beton daur ulang yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas dan konsistensi material tersebut (C. Liu et al., 2020). Namun, meskipun regulasi dan teknologi terus berkembang, keberlanjutan penggunaan beton daur ulang dalam skala besar memerlukan evaluasi lebih lanjut terkait dengan efisiensi penggunaan sumber daya dan dampak lingkungannya, serta kesesuaian dengan standar teknis yang berlaku dalam industri konstruksi.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis yang lebih mendalam mengenai keberlanjutan dan sumber daya dalam penggunaan beton daur ulang pada proyek konstruksi skala besar. Fokus utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi sejauh mana beton daur ulang dapat diandalkan dalam konteks konstruksi skala besar dengan memperhatikan faktor-faktor teknis, ekonomi, dan

lingkungan. Penelitian ini diharapkan dapat membantu merumuskan kebijakan dan praktik terbaik untuk menggunakan beton daur ulang di industri konstruksi. Tujuannya adalah untuk mengetahui kekuatan beton daur ulang yang dibuat dengan agregat kasar dari limbah beton pada proyek konstruksi bersekala besar, serta memberikan wawasan lebih lanjut mengenai potensi dan tantangan dari penggunaan material ini untuk pembangunan yang lebih berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa kekuatan mekanik dan keberlanjutan beton daur ulang dengan mengganti sebagian agregat kasar menggunakan limbah beton, serta menganalisis potensi penerapannya dalam proyek konstruksi skala besar.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan limbah beton sebagai pengganti sebagian agregat kasar pada campuran beton. Variasi penggantian limbah beton yang digunakan meliputi 10%, 20%, 30%, dan 40%, sedangkan beton kontrol menggunakan 100% agregat alami. Pengujian dilakukan pada umur 7 dan 28 hari untuk kuat tekan, serta pada umur 28 hari untuk kuat tarik belah.

2.2. Pengumpulan Data

2.2.1. Bahan dan Material

- a. Semen: Semen Portland Komposit (PCC) digunakan dalam semua campuran beton, dengan berat jenis 3.145 kg/m^3 dan luas permukaan spesifik $382 \text{ m}^2/\text{kg}$, sesuai dengan SNI 15-7064-2004 (SNI, 2004).
- b. Agregat Halus: Pasir yang digunakan memenuhi spesifikasi SNI 03-1968-1990, dengan berat jenis 2.13 g/cm^3 (SNI, 1990).
- c. Agregat Kasar: Agregat kasar berupa batu pecah yang berasal dari tambang lokal di Desa Ujong Sikuneng, Nagan Raya, Aceh, yang memenuhi standar SNI 03-1968-1990 (SNI, 1990).
- d. Limbah Beton: Limbah beton berasal dari sisa ready mix beton K300 dengan ukuran 2-3 cm. Limbah beton ini digunakan untuk menggantikan sebagian agregat kasar dalam variasi 10%, 20%, 30%, dan 40%.
- e. Air: Air tawar dari sumur bor di laboratorium digunakan untuk pencampuran beton.

2.2.2. Prosedur Pencampuran Beton

Proses pencampuran beton dilakukan dalam beberapa tahapan berikut:

- a. Rasio Campuran Beton:
 - 1) Rasio bahan dihitung berdasarkan desain campuran dengan rasio air-semen (w/c) sebesar 0,5.
 - 2) Variasi limbah beton adalah 0% (kontrol), 10%, 20%, 30%, dan 40%, menggantikan agregat kasar.
- b. Pengukuran Slump: Konsistensi beton diukur menggunakan kerucut Abrams sesuai standar BS EN 12350-2, dengan rentang slump yang diinginkan 60-180 mm.
- c. Pencampuran Bahan:
 - 1) Semua bahan kering (semen, pasir, agregat kasar, dan limbah beton) ditimbang sesuai rasio campuran.
 - 2) Bahan kering dimasukkan ke dalam *mixer beton*. Air ditambahkan sedikit demi sedikit sambil diaduk hingga campuran homogen.
 - 3) Konsistensi campuran diperiksa dengan alat pengukur slump. Jika tidak sesuai, rasio air-semen disesuaikan hingga mencapai konsistensi yang diinginkan.

2.2.3. Persiapan Spesimen Beton

- Pencetakan: Campuran beton dituangkan ke dalam cetakan silinder baja berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm.
- Pemadatan: Beton dipadatkan menggunakan batang penumbuk standar untuk memastikan tidak ada rongga udara.
- Penyimpanan Awal: Spesimen dibiarkan selama 24 jam pada suhu ruang laboratorium.
- Perawatan (Curing): Setelah 24 jam, spesimen direndam dalam air bersih pada suhu 25°C hingga waktu pengujian.

2.3. Analisis Data

- Pengujian Kuat Tekan
Kekuatan tekan diuji menggunakan *Universal Testing Machine* sesuai SNI 1974:2011 pada umur 7 dan 28 hari. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi seberapa baik beton dengan limbah beton dapat memenuhi desain kuat tekan rencana sebesar 25 MPa.
- Pengujian Kuat Tarik Belah
Kuat tarik belah diuji pada umur 28 hari dengan metode tekan silinder sesuai SNI 03-2491-2002. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan beton menahan gaya tarik.
- Perhitungan Modulus Elastisitas
Modulus elastisitas dihitung menggunakan persamaan yang terdapat dalam SNI 2847:2019. Nilai kuat tekan digunakan sebagai parameter utama untuk menentukan elastisitas beton.

2.4. Analisis Statistik

Data hasil pengujian dianalisis secara statistik menggunakan metode deskriptif untuk:

- Membandingkan hasil pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah pada setiap variasi campuran beton.
- Mengidentifikasi hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik belah melalui rasio hasil pengujian dan korelasi statistik.

2.5. Evaluasi Keberlanjutan

Evaluasi dampak keberlanjutan dilakukan dengan mempertimbangkan pengurangan limbah konstruksi, penghematan bahan baku alami, dan potensi pengurangan jejak karbon dari penggunaan limbah beton. Analisis ini bertujuan untuk menilai kelayakan beton daur ulang sebagai material konstruksi ramah lingkungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kekuatan Tekan Beton

Tabel 1 menyajikan hasil uji kuat tekan beton pada umur 7 dan 28 hari, sementara Tabel 2 menampilkan rasio peningkatan kuat tekan untuk setiap variasi campuran dibandingkan beton kontrol.

Tabel 1. Hasil Uji Kuat Tekan Beton

Kode Campuran	Kuat Tekan 7 Hari (MPa)	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)
LB0 (Kontrol)	28.27	34.39
LB10	28.36	40.03
LB20	23.64	32.22
LB30	22.68	32.68
LB40	22.92	32.22

Tabel 2. Rasio Peningkatan Kuat Tekan Beton dibandingkan Beton Kontrol

Kode Campuran	Rasio Peningkatan (%) pada 7 Hari	Rasio Peningkatan (%) pada 28 Hari
LB0 (Kontrol)	-	-
LB10	+0.32	+16.37
LB20	-16.39	-6.31
LB30	-19.76	-4.97
LB40	-18.91	-6.31

Hasil tes kekuatan tekan beton pada 7 dan 28 hari, serta modulus elastisitas (E_c) yang dihitung berdasarkan kekuatan tekannya. Kuat tekan beton meningkat seiring bertambahnya usia. Pada 28 hari, kuat tekan beton rata-rata melebihi 25 MPa pada semua variasi penggantian agregat kasar dengan limbah beton, dan pada 28 hari, kuat tekan beton dengan penggantian limbah beton 10% hingga 40% lebih tinggi, atau hampir setara dengan desain kuat tekan (25 MPa). Ini menunjukkan bahwa limbah beton dapat digunakan untuk menghasilkan beton dengan kekuatan yang cukup untuk aplikasi struktural. Modulus elastisitas beton mengikuti tren kekuatan tekannya, yang berarti nilai modulus elastisitasnya meningkat dengan kekuatan tekannya. Ini menunjukkan bahwa kuat tekan dan sifat elastis beton dipengaruhi oleh penggantian agregat kasar dengan limbah beton.

Kurad et al. (2017) menyatakan bahwa beton yang dibuat dari limbah beton memiliki kekuatan tekan yang lebih besar daripada beton biasa, terutama beton yang telah berumur lebih dari 28 hari. Ini disebabkan oleh sisa-sisa semen yang tidak terdehidrasi yang terletak di permukaan partikel agregat limbah beton, yang bereaksi dengan air, seperti yang disebutkan oleh Poon et al. (2004). Namun, penggantian agregat limbah beton 20-40% mengalami penurunan kecil sekitar 1,5-6,3% dari beton normal (LB0). Ini disebabkan oleh adanya dua jenis zona transisi antarmuka (ITZ) dalam matriks (Kong et al., 2010; Lotfi et al., 2014; Kou et al., 2011). Tingkat kekuatan campuran beton ini, yang mengandung agregat limbah 20-40%, berkisar antara 93,7 dan 98,5% dibandingkan dengan beton biasa.

3.2. Kekuatan Tarik Belah Beton

Tabel 3 menyajikan hasil uji kuat tarik belah beton pada umur 28 hari. Tabel 4 menunjukkan rasio penurunan kuat tarik belah dibandingkan beton kontrol.

Tabel 3. Hasil Uji Kuat Tarik Belah Beton (28 Hari)

Kode Campuran	Kuat Tarik Belah (MPa)
LB0 (Kontrol)	3.85
LB10	3.93
LB20	3.66
LB30	3.61
LB40	3.36

Tabel 4. Rasio Penurunan Kuat Tarik Belah dibandingkan Beton Kontrol

Kode Campuran	Rasio Penurunan (%)
LB0 (Kontrol)	-
LB10	+1.99
LB20	-4.94
LB30	-6.23
LB40	-12.73

Penggantian 10% limbah beton menghasilkan peningkatan kuat tarik belah sebesar 1,99% dibandingkan kontrol karena kontribusi semen sisa pada limbah beton. Penurunan signifikan pada penggantian lebih dari 10% diduga akibat lemahnya ikatan antara limbah beton dan matriks beton, sebagaimana juga dilaporkan oleh Silva et al. (2015).

3.3. Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton

Tabel 5 menyajikan perbandingan kuat tekan dan kuat tarik belah beton pada umur 28 hari.

Tabel 5. Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton (28 Hari)

Kode Campuran	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik Belah (MPa)	Rasio Kuat Tarik/Kuat Tekan (%)
LB0 (Kontrol)	34.39	3.85	11.20
LB10	40.03	3.93	9.82
LB20	32.22	3.66	11.36
LB30	32.68	3.61	11.05
LB40	32.22	3.36	10.43

Rasio kuat tarik terhadap kuat tekan menunjukkan fluktuasi kecil dengan nilai rata-rata 10%-12%. Korelasi yang lemah antara kedua parameter ($R=0,63$) mengindikasikan bahwa sifat mekanik ini dipengaruhi oleh faktor yang berbeda, sejalan dengan temuan Kong et al. (2010).

3.4 Keberlanjutan Penggunaan Beton Daur Ulang

Tabel 6. Dampak Keberlanjutan Penggunaan Beton Daur Ulang

Aspek	Pengaruh Positif	Pengaruh Negatif
Limbah konstruksi	Mengurangi limbah konstruksi	Membutuhkan proses pemrosesan tambahan
Sumber daya alam	Menghemat bahan baku alami	Potensi penurunan kualitas ITZ
Emisi karbon	Mengurangi emisi karbon	Bergantung pada teknologi pengolahan limbah
Skala aplikasi	Potensi aplikasi pada proyek besar	Membutuhkan pengendalian kualitas material

Penggunaan limbah beton hingga 10% memberikan dampak keberlanjutan optimal tanpa mengorbankan performa mekanik. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan teknologi pemrosesan limbah beton guna meningkatkan kualitas material.

4. KESIMPULAN

4.1. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi penggunaan limbah beton sebagai pengganti sebagian agregat kasar dalam campuran beton untuk proyek konstruksi berskala besar. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, beberapa kesimpulan utama dapat diambil sebagai berikut: a) **Kuat Tekan Beton:** Penggantian limbah beton hingga 40% menghasilkan kuat tekan yang memenuhi desain kuat tekan 25 MPa pada umur 28 hari. Penggantian 10% limbah beton memberikan peningkatan kuat tekan signifikan sebesar 16,37% dibandingkan beton kontrol, sementara penggantian di atas 10% menyebabkan sedikit penurunan (hingga 6,31%), terutama karena kualitas ikatan transisi antarmuka (ITZ) yang kurang optimal. b) **Kuat Tarik Belah Beton:** Penggantian 10% limbah beton meningkatkan kuat tarik belah sebesar 1,99%. Namun, penggantian lebih dari 10% menurunkan kuat tarik belah secara signifikan, mencapai 12,73% pada penggantian 40%. Hal ini disebabkan oleh kekuatan tarik intrinsik limbah beton yang lebih rendah dan lemahnya ikatan antara partikel limbah beton dan matriks beton. c) **Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah:** Korelasi antara kuat tekan dan kuat tarik belah menunjukkan hubungan yang lemah ($R=0,63$), mengindikasikan bahwa kedua sifat mekanik ini dipengaruhi oleh faktor yang berbeda. Untuk aplikasi tertentu, perhatian khusus harus diberikan pada kuat tarik belah jika limbah beton digunakan dalam campuran. d) **Keberlanjutan Penggunaan Beton Daur Ulang:** Penggunaan limbah beton hingga 10% memberikan dampak positif terhadap keberlanjutan konstruksi, termasuk pengurangan limbah konstruksi, penghematan sumber daya alam, dan pengurangan emisi karbon. Namun, penggantian limbah beton yang lebih tinggi memerlukan pengembangan teknologi untuk meningkatkan kualitas material.

4.2. Rekomendasi Praktis

- a. **Optimalisasi Campuran Beton**
Disarankan untuk menggunakan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar hingga 10% untuk mencapai performa mekanik optimal. Pada penggantian lebih dari 10%, campuran perlu diperkuat dengan bahan tambahan atau teknologi pemrosesan untuk meningkatkan ikatan ITZ.
- b. **Pengembangan Teknologi Pengolahan Limbah Beton**
Proses pemrosesan limbah beton seperti pemurnian atau penggunaan bahan tambahan (admixture) harus ditingkatkan untuk meminimalkan dampak negatif pada sifat mekanik beton.
- c. **Penerapan pada Proyek Skala Besar**
Limbah beton dengan penggantian hingga 10% layak untuk diterapkan pada proyek berskala besar dengan pertimbangan keberlanjutan, terutama pada proyek yang membutuhkan material dengan performa kuat tekan tinggi.
- d. **Penelitian Lanjutan**
Diperlukan penelitian jangka panjang untuk mengevaluasi durabilitas beton daur ulang dalam kondisi lingkungan ekstrem dan mengkaji lebih jauh dampak lingkungan serta ekonomi dalam skala yang lebih besar.

4.3. Implikasi Keberlanjutan

Penelitian ini menegaskan potensi beton daur ulang sebagai material konstruksi berkelanjutan yang mendukung ekonomi sirkular. Penggunaan limbah beton dapat mengurangi limbah konstruksi, menghemat bahan baku alam, dan menurunkan emisi karbon. Namun, untuk mencapai penerapan yang lebih luas, dibutuhkan sinergi antara inovasi teknologi, regulasi pemerintah, dan kesadaran industri untuk memastikan bahwa beton daur ulang dapat digunakan secara efektif tanpa mengorbankan kualitas struktur.

4.4. Kontribusi terhadap Upaya Keberlanjutan

Penelitian ini berkontribusi pada upaya keberlanjutan dalam industri konstruksi dengan cara berikut:

- a. **Pengurangan Limbah Konstruksi**
Menggunakan limbah beton mengurangi volume limbah yang harus dibuang ke TPA, membantu mengatasi masalah lingkungan akibat pembuangan limbah konstruksi.
- b. **Konservasi Sumber Daya Alam**
Menggantikan sebagian agregat kasar dengan limbah beton mengurangi ketergantungan pada bahan baku alam seperti kerikil dan pasir, yang ketersediaannya semakin terbatas.
- c. **Pengurangan Emisi Karbon**
Pemanfaatan limbah beton mengurangi kebutuhan energi dalam proses produksi agregat baru, membantu mengurangi jejak karbon konstruksi.
- d. **Mendukung Ekonomi Sirkular**
Penelitian ini mempromosikan prinsip daur ulang dan penggunaan kembali material dalam industri konstruksi, mendukung ekonomi sirkular untuk pembangunan berkelanjutan.

4.5. Arah Penelitian Lanjutan

- a. **Durabilitas Jangka Panjang**
Penelitian jangka panjang diperlukan untuk mengevaluasi performa beton daur ulang dalam berbagai kondisi lingkungan ekstrem, seperti suhu tinggi, kelembapan tinggi, atau paparan bahan kimia. Hal ini penting untuk memahami ketahanan beton daur ulang dalam aplikasi struktural.
- b. **Pengaruh Terhadap Struktur Mikro**
Analisis mikrostruktur limbah beton dan hubungan dengan kualitas ITZ perlu diteliti lebih dalam untuk mengidentifikasi mekanisme penurunan performa pada penggantian tinggi.
- c. **Pengolahan Limbah Beton**

Penelitian lebih lanjut pada teknologi pengolahan limbah beton, seperti pemurnian partikel atau penggunaan bahan tambahan (admixture), untuk meningkatkan kualitas agregat limbah.

d. Evaluasi Ekonomi dan Dampak Lingkungan

Analisis siklus hidup (life cycle analysis) dari beton daur ulang perlu dilakukan untuk mengevaluasi manfaat ekonomis dan lingkungan secara menyeluruh, termasuk biaya pengolahan, transportasi, dan pengurangan jejak karbon.

e. Aplikasi Skala Besar

Penelitian pada proyek konstruksi berskala besar diperlukan untuk mengevaluasi performa beton daur ulang dalam skenario nyata, termasuk pengaruh beban dinamis dan umur layan beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Belaïd, F. (2022). How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 15(April), 200084. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200084>
- Chikezirim, O., & Mwanaumo, E. (2013). Evaluation of Waste Management Strategies Adopted in Tshwane Building Industry. *Journal of Construction Project Management and Innovation*, 3(1), 498–510.
- Cincinelli, A., Scopetani, C., Chelazzi, D., Lombardini, E., Martellini, T., Katsoyiannis, A., Fossi, M. C., & Corsolini, S. (2017). Microplastic in the surface waters of the Ross Sea (Antarctica): Occurrence, distribution and characterization by FTIR. *Chemosphere*, 175, 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.024>
- Commission, E. (2018). State of the Union 2018: European Commission proposes measures for securing free and fair European elections. *Press Release*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_18_5681
- Dunia, B. (2021). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. Washington. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/d3f9d45e-115f-559b-b14f-28552410e90a>
- Kurad, R., Silvestre, J. D., de Brito, J., & Ahmed, H. (2017). Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166, 485–502. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.236>
- Kwan, K. Y., Allchorne, A. J., Vollrath, M. A., Christensen, A. P., Zhang, D. S., Woolf, C. J., & Corey, D. P. (2006). TRPA1 Contributes to Cold, Mechanical, and Chemical Nociception but Is Not Essential for Hair-Cell Transduction. *Neuron*, 50(2), 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.03.042>
- Liu, C., Wolter, C., Xian, W., & Jeschke, J. M. (2020). Most invasive species largely conserve their climatic niche. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(38), 23643–23651. <https://doi.org/10.1073/pnas.2004289117>
- Liu, M., Li, L., Zheng, S. J., Zhao, J., Ungvari, G. S., Hall, B. J., Duan, Z. P., & Xiang, Y. T. (2017). Prevalence of Major Depression and Its Associations With Demographic and Clinical Characteristics and Quality of Life in Chinese Patients With HBV-related Liver Diseases. *Archives of Psychiatric Nursing*, 31(3), 287–290. <https://doi.org/10.1016/j.apnu.2017.02.004>
- Lotfi, S., Deja, J., Rem, P., Mróz, R., Van Roekel, E., & Van Der Stelt, H. (2014). Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.010>
- Poon, C. S. (2007). Management of construction and demolition waste. *Waste Management*, 27(2), 159–160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.10.012>
- Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 83, 108–118.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.034>

SNI. (1990). Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar. *Sni 03-1968-1990*, 1–5. <https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/sni-1970-2016-cara-uji-berat-jenis-dan-penyerapan-air-agregat-halus>

SNI, S. N. I. (2004). Semen Portland Komposit. *Nasional, Badan Standardisasi, ICS 91.100*, 1–8.

Halaman Ini Dikosongkan