

Menguraikan Perilaku Riwayat Beban Waktu Tarik dan Emisi Karbon Dioksida pada Beton yang Dibuat dengan Batu Bata Tahan Api Tipe Kromium-Ferit-Magnesia

Muhammad Huzair T^{1*}, Afif Taufiiqul Hakim¹, Dwi Aneka Kartini¹, Komang Saka Suwindu²

^{1*}Institut Teknologi Kalimantan

²Universitas Papua

*Email: huzair.t@lecturer.itk.ac.id

Abstract

This research outlined the results of an experimental investigation of the adoption of refractory brick (RB) as a substitute for coarse aggregate in sustainable concrete production. The concrete mix is produced with two water-cement ratios (w/c) of 0.52 and 0.49, containing 0%, 15%, 30%, and 50% RB as a substitute for virgin coarse aggregate (VCA). The mechanical properties tested in this experiment are compressive strength and indirect tensile strength, as well as the relationship between tensile load and time, the ratio of CO_{2e} to indirect tensile strength, and acceptance criteria. The test results showed that the compressive strength and indirect tensile strength value decreased along with the increasing percentage of RB adoption as in the concrete mixture. In addition, all phases in the load and time relationships, as well as CO_{2e}, decrease as the percentage of RB in the concrete mixture increases. The results of the acceptance criteria with the adoption of RB, show that the mixture designed with the adoption of RB variations of 15% and 30% can function as an alternative to VCA. For the acceptance criteria for CO_{2e} against indirect tensile strength based on the SAI analogy, this research provides a maximum difference limit of 20% to be declared acceptable for use as an alternative to VCA. Thus, the use of 15% and 30% RB instead of VCA is an acceptable and feasible option for sustainable concrete production.

Keywords: Refractory brick (RB), indirect tensile strength, relationship between tensile load and time, carbon dioxide emissions (CO_{2e}), acceptance criteria.

Abstrak

Penelitian ini menyajikan hasil investigasi eksperimental pengadopsian limbah batu bata tahan api (RB) sebagai pengganti agregat kasar dalam produksi beton berkelanjutan. Campuran beton diproduksi dengan dua rasio air semen (w/c) sebesar 0.52 dan 0.49 yang mengandung RB 0%, 15%, 30%, dan 50% sebagai pengganti batu pecah alami (VCA). Sifat mekanik yang diuji dalam percobaan ini adalah kuat tekan dan kuat tarik belah, serta hubungan beban tarik terhadap waktu, CO_{2e}, rasio CO_{2e} terhadap kekuatan tarik, dan kriteria penerimaan. Hasil pengujian menunjukkan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya persentase pengadopsian RB sebagai batu pecah alami pada campuran beton. Selain itu, semua fase dalam hubungan beban dan waktu serta CO_{2e} menurun seiring dengan meningkatnya persentase RB dalam campuran beton. Dari hasil kriteria penerimaan dengan pengadopsian RB menunjukkan bahwa campuran yang dirancang dengan adopsi RB variasi 15% dan 30% dapat berfungsi sebagai alternatif pengganti VCA. Untuk kriteria penerimaan CO_{2e} terhadap kuat tarik belah yang berdasarkan analogi SAI, penelitian ini memberikan batas selisih maksimal sebesar 20% untuk dinyatakan dapat diterima untuk digunakan sebagai alternatif pengganti VCA. Dengan demikian, penggunaan RB 15% dan 30% sebagai pengganti VCA merupakan pilihan yang dapat diterima dan layak untuk produksi beton berkelanjutan.

Kata kunci: Agregat batu bata tahan api (RB), kuat tarik belah, hubungan beban tarik terhadap waktu, emisi karbon dioksida (CO_{2e}), kriteria penerimaan.

1. Pendahuluan

Selama beberapa dekade, industri beton telah memanfaatkan banyak batu alam dan pasir, dua komponen terpenting untuk menjaga keseimbangan ekologi dan sumber daya alam dalam upaya mempercepat pembangunan gedung dan infrastruktur bertingkat secara signifikan [1]. Perubahan besar pada lingkungan alam di sekitar lokasi penambangan batu alam dan pasir sedang terjadi dalam beberapa dekade terakhir, dan perubahan ini berpotensi menyebabkan bencana besar seperti banjir besar dan tanah longsor [2]. Perubahan-perubahan ini tidak diabaikan oleh komunitas ilmiah, pembuat kebijakan, atau pemerhati lingkungan. Pengenalan produk samping padat yang tidak berbahaya, misalnya limbah batu bata tahan api (RB) sebagai pengganti batu pecah alami memang merupakan langkah penting dalam pengelolaan lingkungan berkelanjutan dengan tujuan untuk menangani masalah dumping dan bencana sumber daya alam [3] [4]. RB adalah material konstruksi yang mampu mempertahankan bentuk dan kekuatannya pada temperatur tinggi [5] [6].

Limbah bata dan keramik telah banyak dikaji sebagai agregat alternatif dalam beton. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaannya pada kadar tertentu dapat mempertahankan atau meningkatkan kuat tarik belah. Namun, kadar penggantian yang tinggi juga dapat menurunkan kekuatan akibat meningkatnya porositas, penyerapan air, ketidakseragaman partikel, dan perubahan zona transisi antara agregat dan pasta semen [7], [8], [9]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kinerja beton sangat dipengaruhi oleh jenis, komposisi, dan proporsi material limbah yang digunakan.

Karakteristik limbah bata tahan api berbeda dari bata tanah liat dan keramik biasa karena material tersebut dirancang untuk bekerja pada temperatur tinggi serta lingkungan kimia yang agresif. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa limbah bata tahan api dapat digunakan sebagai agregat beton dan pada proporsi tertentu masih dapat

menghasilkan sifat mekanis yang memadai [10], [11]. Namun, kajian tersebut umumnya berfokus pada kuat tekan, kuat lentur, kuat tarik belah maksimum, penyerapan air, dan densitas beton.

Bata tahan api tipe kromium–ferit–magnesia memiliki kandungan mineral berbasis magnesia, kromium, dan oksida besi yang membedakannya dari limbah bata lainnya. Kandungan kromium juga memerlukan perhatian karena dalam kondisi tertentu dapat berkaitan dengan pembentukan kromium heksavalen atau Cr(VI), yang memiliki mobilitas dan toksisitas lebih tinggi dibandingkan Cr(III) [12][13]. Oleh karena itu, pemanfaatan material tersebut perlu dinilai tidak hanya dari kekuatannya, tetapi juga dari aspek lingkungan dan kelayakan teknisnya.

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih terdapat beberapa celah penelitian. Pertama, pengujian tarik belah umumnya hanya melaporkan beban atau tegangan maksimum tanpa menganalisis perkembangan beban terhadap waktu. Padahal, hubungan beban–waktu dapat memberikan informasi tambahan mengenai laju mobilisasi beban, waktu menuju beban puncak, kestabilan pembebanan, dan proses keruntuhan benda uji.

Kedua, emisi karbon dan sifat mekanis beton sering dievaluasi secara terpisah. Emisi yang rendah belum tentu menunjukkan campuran yang efisien apabila disertai penurunan kekuatan yang besar. Oleh karena itu, diperlukan indikator intensitas karbon berbasis kinerja melalui perbandingan emisi CO₂ dengan kekuatan yang dihasilkan. Pendekatan serupa telah digunakan untuk menghubungkan emisi karbon dan kuat tekan material berbasis semen, tetapi penerapannya terhadap kuat tarik belah beton berbasis limbah bata tahan api masih terbatas [14], [15]

Selain itu, kajian mengenai penggunaan bata tahan api tipe kromium–ferit–magnesia sebagai agregat beton masih terbatas. Belum banyak penelitian yang secara terpadu menggabungkan kuat tarik belah, hubungan beban–waktu, emisi CO₂, rasio CO₂e terhadap

kuat tarik, dan kriteria penerimaan teknis dalam satu evaluasi.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penggunaan batu bata tahan api tipe kromium–ferit–magnesia terhadap perilaku tarik dan kinerja lingkungan beton. Evaluasi dilakukan melalui pengujian kuat tarik belah, analisis riwayat beban–waktu, perhitungan emisi CO₂, rasio CO₂e terhadap kuat tarik, dan pemeriksaan kriteria penerimaan. Kebaruan penelitian terletak pada penerapan kerangka evaluasi terpadu yang menghubungkan respons pembebanan, kapasitas tarik, dan intensitas karbon beton berbasis limbah bata tahan api kromium–ferit–magnesia.

2. Metoda Penelitian

2.1. Bahan

Mengingat salah satu tujuan penelitian adalah untuk mengetahui kesesuaian campuran semen *Portland Cement Composite* (PCC) dengan agregat kasar RB, maka semen campuran PCC yang tersedia secara komersial dijadikan sebagai bahan pengikat utama dalam pembuatan keseluruhan campuran beton dalam penelitian ini. PCC yang digunakan adalah SNI 7064 “Semen Komposit Portland Standar Nasional Indonesia, 2014” dengan berat jenis 3,07 [16]. Sifat fisik dan kimia semen PCC tercantum pada Tabel 1.

Agregat halus merupakan pasir alam yang ditambang dari sungai dan mudah diperoleh. Dalam penelitian ini, pasir sungai didefinisikan sebagai RS. Batuan biasa yang menutupi banyak permukaan di lokasi perolehan nikel yang sama dipecah menjadi skala yang lebih kecil, bentuk yang lebih kasar, dan dianggap sebagai agregat kasar. Dalam penelitian ini, agregat tersebut didefinisikan sebagai batu pecah alami (VCA) yang digunakan dalam proses pembuatan campuran beton.

Distribusi ukuran RS, VCA, dan RB telah memenuhi standar gradasi campuran beton sesuai SNI 03-2834 “Standar Nasional Indonesia Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Kontrol, 2000” [17]. Nilai RS, VCA, dan RB ditunjukkan pada gambar 1.

RB yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari lantai dasar tungku pembakaran biji nikel di Sorowako, Indonesia. RB tersebut dihancurkan secara manual dan disaring hingga diperoleh ukuran dan jumlah yang dibutuhkan untuk menghasilkan RB dengan ukuran 10–28 mm. Gambar 2 menunjukkan tampilan fisik RS, VCA, dan RB. Senyawa kimia RB tercantum pada Tabel 2, sedangkan sifat fisik RS, VCA dan RB ditunjukkan pada Tabel 3.

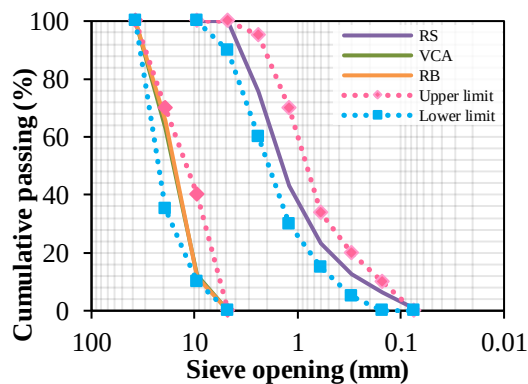
Komponen utama RB berdasarkan senyawa kimia yang tercantum pada Tabel 2 yang semuanya dapat dikategorikan reaktif karena suhu pembakarannya yang tinggi. Kandungan Cr₂O₃ sebesar 27,35%, sehingga potensi pelindian kromium perlu diperhatikan. Namun, hasil XRF hanya menunjukkan kandungan kromium dalam bentuk ekuivalen oksida dan belum dapat membedakan Cr(III) dan Cr(VI). Cr(VI) perlu mendapat perhatian khusus karena memiliki mobilitas dan toksisitas yang lebih tinggi. Matriks semen dapat mengurangi pelepasan kromium melalui proses solidifikasi dan enkapsulasi [18]. Karena penelitian ini belum melakukan pengujian spesiasi dan pelindian, keamanan lingkungan beton RB belum dapat disimpulkan.

Berdasarkan sifat fisik yang tercantum pada Tabel 3, RB memiliki bobot jenis yang lebih rendah dan daya serap air yang lebih tinggi dibandingkan VCA. Tingginya serapan air ini disebabkan adanya pori-pori pada permukaan RB. Karena RB mempunyai daya serap air yang tinggi, maka sebelum dimasukkan ke dalam campuran beton, RB terlebih dahulu diolah dengan cara direndam dalam air selama 4 jam kemudian dikeringkan di udara hingga permukaannya kering dan jenuh (SSD). Pendekatan ini sejalan dengan metodologi yang diterapkan oleh [19] [20]. Pendekatan ini mengurangi kehilangan air selama pencampuran karena tingginya serapan air RB. Dalam pengujian abrasi di *Los Angeles*, kemampuan RB dalam menahan aksi mekanis lebih rendah dibandingkan VCA.

Tabel 1. Properti PCC

Properti	Nilai
<i>Properti fisik:</i>	
Berat jenis (gr/cm ³)	3.07
Kepadatan curah (kg/liter)	1.09
Waktu pengaturan:	
- Set awal (menit)	131
- Set salah (menit)	223
Set salah, penetrasi akhir (%)	76.97
<i>Sifat Kimia:</i>	
Kalsium oksida (CaO), %	61.80
Silikon dioksida (SiO ₂), %	18.38
Aluminium trioksida (Al ₂ O ₃), %	5.16
Besi oksida (Fe ₂ O ₃), %	3.40
Belerang trioksida (SO ₃), %	1.82
Magnesium oksida (MgO), %	0.98
Kehilangan pengapian (LOI), %	4.62
Residu tidak larut, (%)	2.77
Yang lain, (%)	1.07

Sumber: [21]



Gambar 1. Gradasi ukuran butir agregat



Gambar 2. Penampilan fisik agregat

Tabel 2. Senyawa kimia RB

Senyawa	RB
Magnesium Oxide (MgO)	8.69
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	51.24
Chromium Oxide (Cr ₂ O ₃)	27.35
Sulfur Trioxide (SO ₃)	4.87
Niobium Pentoxide (Nb ₂ O ₅)	0.08
Aluminium Trioxide (Al ₂ O ₃)	2.53
Calcium Oxide (CaO)	1.96
Loss of Ignition (LOI)	1.81
Indium Oxide (In ₂ O ₃)	0.008
Titanium Dioxide (TiO ₂)	0.81
Zirkonium Dioxide (ZrO ₂)	0.08
Nickel Oxide (NiO)	0.57
Manganese Oxide (MnO)	0
Tin Dioxide (SnO ₂)	0.051
Pottasium Oxide (K ₂ O)	0
Silicon Dioxide (SiO ₂)	4.61
Insoluble residue	-
Others	-
Phosphorus pentoxide (P ₂ O ₅)	0.74
Zinc oxide (ZnO)	0.05

Tabel 3. Sifat fisik agregat

Properti	Spesifik Gravitasi (SSD)	Penyerapan air (%)	Modulus Halus	Abrasi Los Angeles (%)
RS	3.02	0.45	3.70	-
VCA	3.13	0.36	7.25	17.50
RB	2.92	2.91	7.20	62.25
Penguji an standar	[22] dan [23]		[24]	[25]

2.2. Pencampuran proporsi dan persiapan spesimen

Perancangan campuran beton dilakukan melalui proses *trial mix* sehingga diperoleh komposisi campuran yang sebanding dengan w/c masing-masing sebesar 0.52 dan 0.49. Delapan komposisi pencampuran beton dibuat untuk beton kontrol (VC) dan menggunakan produk samping RB sebagai pengganti sebagian VCA pada volume 0%, 15%, 30%, dan 50%. Desain campuran beton disajikan pada Tabel 4.

Sampel beton diproduksi menggunakan mixer 75 liter. Tahap pertama, RB, VCA, RS, dan semen dicampur dalam mixer selama 60 detik. Kemudian, air ditambahkan secara bertahap ke dalam mixer dan pencampuran dilanjutkan selama 120 detik. Selanjutnya

campuran beton diaduk secara manual agar bahan-bahan yang menempel pada bagian bawah dan dinding mixer tercampur rata. Pencampuran dilanjutkan selama 60 detik hingga diperoleh kombinasi beton segar yang seragam. Campuran segar kemudian dituangkan ke dalam cetakan silinder baja dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm dan digetarkan selama 60 detik menggunakan mesin vibrator. Campuran beton kemudian didiamkan selama 24 jam sebelum cetakan dibuka, dan sampel beton direndam dalam air tawar dengan suhu konstan $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sampai hari pengujian.

Tabel 4. Desain campuran beton

Notasi	w/c 0.52			
	VC	15% RB	30% RB	50% RB
Air (kg/m^3)	241	241	241	241
Semen (kg/m^3)	461	461	461	461
RS (kg/m^3)	758	758	758	758
VCA (kg/m^3)	1137	963	799	571
RB (kg/m^3)	0	161	320	533

Notasi	w/c 0.49			
	VC	15% RB	30% RB	50% RB
Air (kg/m^3)	239	239	239	239
Semen (kg/m^3)	489	489	489	489
RS (kg/m^3)	746	746	746	746
VCA (kg/m^3)	1120	953	786	563
RB (kg/m^3)	0	159	316	525

2.3 Metode pengujian

2.3.1 Beton segar

Pengujian beton segar dilakukan sesuai dengan ASTM C143 “Metode Uji Degradasi Beton Hidrolik-Semen Standar 1, 2012” [26]. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui secara kualitatif dan kuantitatif pengaruh variasi RB terhadap homogenitas dan kapasitas kerja campuran beton segar. Pada penelitian ini digunakan target slump sebesar 20 ± 2 cm.

2.3.2 Kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji beton berbentuk silinder yang telah direndam selama 28 hari dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm berdasarkan ASTM C39 [27]. Beban diterapkan pada permukaan benda uji dengan kecepatan 0,25 MPa/detik hingga benda uji hancur dengan menggunakan alat mesin uji *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 1000 kN.

2.3.3 Kuat tarik belah beton

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada benda uji beton berbentuk silinder yang telah direndam selama 28 hari dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm berdasarkan ASTM C496-96 [28]. Faktor pembentuk kuat tarik belah sama dengan kuat tekan hanya saja besar kecilnya kuat tarik belah untuk beton kontrol umumnya antara 9% - 15% dari kuat tekan. Nilai kuat tarik belah beton dapat dihitung dengan persamaan (1).

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (1)$$

Di mana:

T = kuat tarik belah beton (N/mm^2)

P = beban beton yang diterima (N)

L = panjang benda uji silinder (mm)

D = diameter benda uji silinder (mm).

Gambar 3 menunjukkan perangkat yang digunakan dalam pengujian untuk menentukan kuatnya mekanisme tarikan. *Load cells* yang dikombinasikan dengan serangkaian perangkat terkomputerisasi digunakan untuk merekam nilai beban tarik dan waktu yang terkait selama proses uji tarik intensif. Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan pada tiga benda uji dari masing-masing campuran beton, dan nilai rata-rata dari ketiga pengujian tersebut diadopsi untuk penilaian kuantitatif.



Gambar 3. Pengaturan pengujian benda uji beton

2.3.4 Emisi CO₂

Karbon yang dilepaskan dari setiap campuran yang tidak mengadopsi dan mengadopsi RB dihitung untuk mengevaluasi kinerja lingkungan. Tabel 5 menunjukkan emisi CO₂ (CO_{2e}) dari setiap komponen beton (air, semen, RS, VCA, dan RB) yang diperoleh dari literatur penelitian terdahulu. Karbon yang dilepaskan oleh beton dihitung berdasarkan persamaan (2) dari literatur [29].

$$CO_{2e} = \sum_{i=1}^n W_i \times CO_2^i \quad (2)$$

Di mana

CO_{2e} = CO_{2e} yang dilepaskan dalam produksi 1 m³ beton (kg.CO₂/m³)

W_i = berat per satuan volume komponen beton (kg/m³)

CO_{2i} = emisi karbon dioksida untuk setiap komponen beton (kg.CO₂/kg).

Tabel 5. CO_{2e} komponen beton

Komponen Beton	Air	Semen	RS	VCA	RB
		n			
CO _{2e} (kg.CO ₂ /kg)	0.00	0.83	0.01	0.036	0.0045
Sumber literatur	[30]	[31]	[32]	[30]	[4]

2.3.5 Rasio CO_{2e} terhadap kekuatan tarik beton (CO_{2e}/T)

Rasio CO_{2e} terhadap kekuatan tarik belah (CO_{2e}/T) dibuat untuk menganalisis secara bersamaan pengaruh emisi CO₂ dan kekuatan tarik terhadap manfaat pengadopsian RB sebagai alternatif pengganti VCA. Nilai intensitas rasio CO_{2e} terhadap kuat tarik belah diperkirakan berdasarkan metode referensi yang diusulkan oleh [33].

2.3.6 Kriteria penerimaan

Kriteria penerimaan ini menganut kriteria indeks aktivitas kekuatan (SAI). SAI pada prinsipnya ditentukan dengan mencetak dua set benda uji berdasarkan resep standar: satu dengan PC 100% (referensi), dan satu lagi dengan bagian PC standar diganti dengan

massa pozzolan yang sesuai diuji [34]. Dalam penelitian ini, satu variasi dengan beton acuan yang menggunakan VCA 100%, dan tiga variasi beton terstandar dengan pengadopsian RB sebagai pengganti VCA sebesar 15%, 30%, dan 50% layak untuk diuji. Parameter ini dihitung sesuai spesifikasi yang diberikan dalam [35] yang dapat dilihat pada persamaan (3).

$$SAI = (A/B) \times 100 \quad (3)$$

Di mana:

SAI = indeks aktivitas kekuatan

A = kuat tarik belah rata-rata campuran beton yang diuji

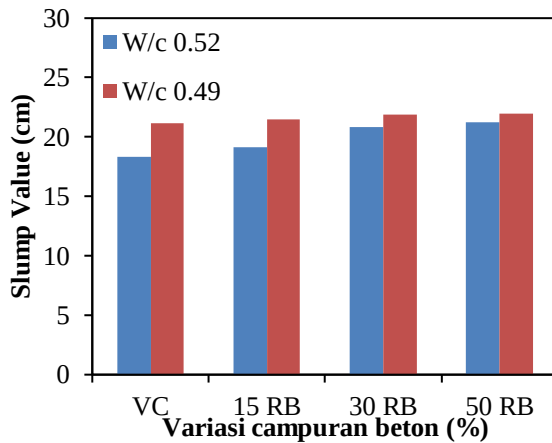
B = kuat tarik belah rata-rata campuran beton kontrol.

3. Hasil Penelitian

3.1. Beton Segar

Gambar 4 menunjukkan hasil pengujian beton segar yang mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50% sebagai pengganti VCA. Untuk w/c 0.52 beton segar VC mempunyai nilai sebesar 18,37 cm. Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50%, secara bertahap naik menjadi 19,16 cm, 20,80 cm, dan 21,27 cm. Sedangkan untuk w/c 0.49 beton segar VC mempunyai nilai sebesar 21,16 cm. Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50%, secara bertahap naik menjadi 21,47 cm, 21,88 cm, dan 21,96 cm.

Penjelasan rasional atas kenaikan nilai beton segar adalah bahwa RB telah mengalami perlakuan awal sebelum dicampur dalam beton dan kedua rasio air-semen dijaga tetap konstan. Penjelasan ini bisa dikaitkan dengan penelitian terdahulu dari [36], [37] di mana penambahan limbah konstruksi dari batu bata konvensional sebagai agregat kasar dalam campuran beton juga meningkatkan nilai slump.



Gambar 4. Beton segar (*slump*) untuk persentase RB berbeda

3.2. Kuat tekan beton

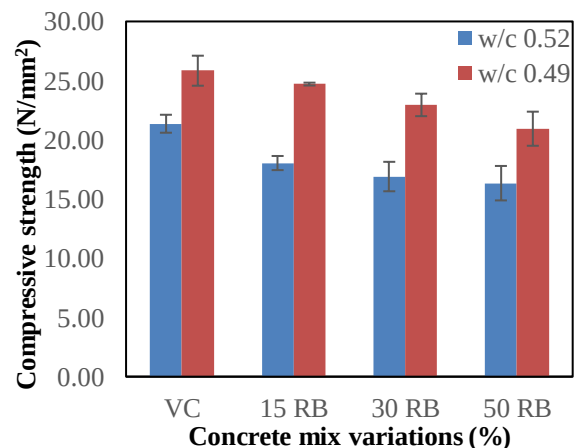
Gambar 5 menunjukkan konsekuensi pengadopsian RB sebesar 15%, 30%, dan 50% sebagai pengganti VCA pada umur 28 hari. Untuk w/c 0.52 kuat tekan campuran VC mempunyai nilai sebesar 21,36 N/mm². Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50%, secara bertahap menurun menjadi 18,04 N/mm², 16,90 N/mm², dan 16,34 N/mm². Nilai tersebut setara dengan 84,46%, 79,12%, dan 76,50% dari kuat tekan VC. Untuk w/c 0.49, campuran VC mempunyai kuat tekan sebesar 25,84 N/mm². Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50% sebagai pengganti VCA, secara bertahap menurun masing-masing menjadi 24,71 N/mm², 22,95 N/mm², dan 20,94 N/mm². Nilai tersebut setara dengan 95,62%, 88,82%, dan 81,04% dari kuat tekan campuran VC.

Penjelasan rasional atas penurunan nilai kuat tekan yang dipicu oleh pengadopsian RB adalah bahwa karakteristik RB yang lebih berpori dibandingkan VCA, hal ini dapat dilihat dari hasil uji pada tabel 3. Hasil ini bisa dikaitkan dengan penelitian terdahulu dari [38], yang melaporkan bahwa beton dengan agregat kasar bernilai abrasi tinggi mempunyai kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan beton dengan agregat kasar yang mempunyai nilai abrasi yang kecil. Karakteristik RB yang lebih berpori dibandingkan VCA juga menyebabkan tingginya daya serap air

sehingga kekuatan campuran beton RB semakin lemah.

Penelitian sebelumnya juga melaporkan mengenai penurunan nilai kuat tekan sebagai konsekuensi dari pengadopsian agregat kasar batu bata konstruksi daur ulang sebagai pengganti agregat kasar alami. Misalnya penelitian dari [39] yang melaporkan penurunan dalam kekuatan tekan seiring dengan penambahan persentase variasi penggunaan agregat kasar batu bata konstruksi daur ulang, dimana penurunan terbesarnya sebesar 28,6% dari beton referensi pada umur 28 hari.

Adapun error bar pada gambar 5 menunjukkan tingkat variasi RB hasil pengujian kuat tekan antarspesimen. Error bar yang relatif kecil menunjukkan bahwa hasil pengujian memiliki penyebaran yang rendah dan konsistensi yang cukup baik.



Gambar 5. Kuat tekan beton untuk persentase RB berbeda

3.3. Kuat tarik belah beton

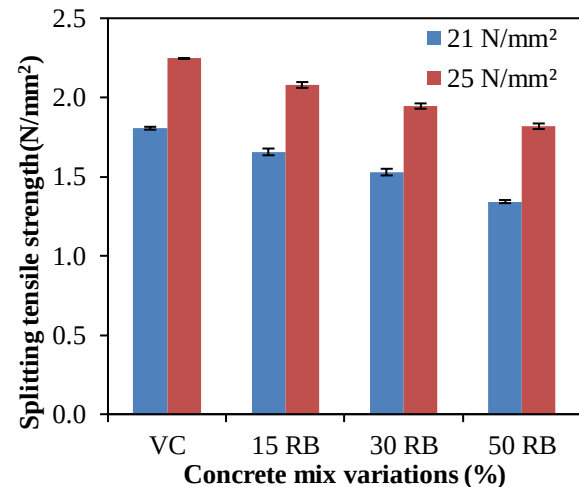
Gambar 6 menunjukkan konsekuensi pengadopsian RB sebesar 15%, 30%, dan 50% sebagai pengganti VCA pada umur 28 hari. Untuk w/c 0.52 kuat tarik belah campuran VC mempunyai nilai sebesar 1,80 N/mm². Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50%, secara bertahap menurun menjadi 1,66 N/mm², 1,53 N/mm², dan 1,34 N/mm². Nilai tersebut setara dengan 92,22%, 85,00%, dan 74,44% dari kuat tarik belah VC. Untuk w/c 0.49, campuran VC mempunyai kuat tarik belah

sebesar 2,25 N/mm². Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50% sebagai pengganti VCA, secara bertahap menurun masing-masing menjadi 2,08 N/mm², 1,95 N/mm², dan 1,82 N/mm². Nilai tersebut setara dengan 92,44%, 86,67%, dan 80,89% dari kuat tarik belah campuran VC.

Penjelasan rasional atas penurunan kekuatan tarik yang dipicu oleh pengadopsian RB adalah bahwa RB memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan VCA, terbukti dari hasil uji abrasi pada tabel 3. Hasil ini bisa dikaitkan dengan penelitian terdahulu dari [40], yang menunjukkan bahwa beton dengan agregat kasar bernilai abrasi tinggi mempunyai kuat tarik belah yang lebih rendah dibandingkan beton dengan agregat kasar yang mempunyai nilai abrasi yang kecil, dimana penurunan nilai terbesar yang dihasilkannya sebesar 17,9% dari beton referensi pada umur 28 hari. Penelitian lain dari [41] yang juga melaporkan penurunan nilai kuat tarik sebagai konsekuensi pengadopsian agregat kasar batu bata daur ulang sebagai pengganti agregat kasar alami, dimana penurunan terbesarnya sebesar 30% dari beton referensi pada umur 28 hari.

Hal ini juga dapat dideteksi dengan jelas, bahwa berapapun jumlah RB yang digunakan sebagai pengganti VCA, penurunan w/c dari 0.52 menjadi 0.49 menyebabkan penurunan kekuatan tarik pada semua campuran. Bukti tersebut menunjukkan bahwa beton yang menggunakan RB masih berperilaku seperti VC yang dipengaruhi oleh besarnya hasil hidrasi campuran semen dengan air. Mengurangi jumlah semen yang dicampur akan menurunkan kemampuan pasta dalam mengikat agregat sehingga kekuatan tariknya menurun. Penelitian ini didukung oleh penelitian sebelumnya dari [42] yang menyatakan bahwa kekuatan tarik berkaitan erat dengan kekuatan matriks semen dan daya rekat (ikatan) matriks terhadap butiran agregat. Rasio air semen yang tinggi dapat mengakibatkan rendahnya kekuatan matriks dan ITZ yang buruk, dan akibatnya dapat mengurangi kekuatan tarik beton.

Adapun error bar pada gambar 6 menunjukkan variasi RB hasil kuat tarik belah antarspesimen. Ukuran error bar yang relatif kecil pada seluruh variasi RB campuran menunjukkan bahwa penyebaran data rendah dan hasil pengujian memiliki konsistensi yang baik.



Gambar 6. Kuat tarik belah beton untuk persentase RB berbeda

3.4 Hubungan beban tarik terhadap waktu

Gambar 7 menunjukkan hubungan beban tarik terhadap waktu pada campuran VC dan campuran beton yang mengadopsi RB dengan variasi 15%, 30%, dan 50% sebagai substitusi parsial VCA pada umur 28 hari. Terlihat pula bahwa benda uji mengalami dua mode, yaitu mode puncak, di mana mode ini dimulai dari awal pembebanan sampai benda uji mengalami beban puncak. Selanjutnya mode ultimate yaitu mode ketika benda uji berada pada kondisi 80% setelah mode puncak, pada mode ini benda uji mulai mengalami keretakan hingga benda uji mengalami kehancuran atau kegagalan.

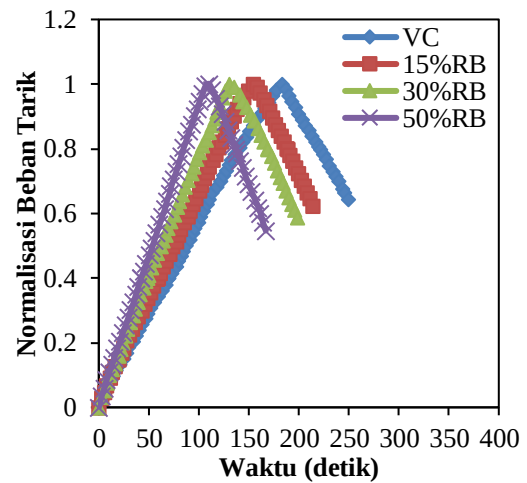
1. Mode puncak

Untuk w/c 0.52, memerlukan waktu 184.00 detik agar benda uji VC mencapai mode puncak. Selanjutnya terlihat bahwa campuran beton yang mengadopsi RB dengan variasi 15%, 30%, dan 50% menghasilkan penurunan waktu menjadi 154.67 detik, 130.94 detik, dan 110.33 detik. Nilai tersebut setara dengan 84.06%, 71.16%, dan 59.96% waktu

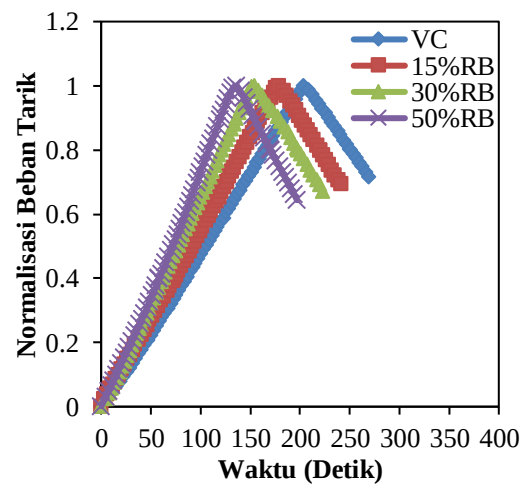
yang dibutuhkan campuran VC untuk mencapai mode puncak. Untuk w/c 0.49 memerlukan waktu 203.00 detik agar benda uji VC mencapai mode puncak. Selanjutnya terlihat bahwa campuran beton yang mengadopsi RB dengan variasi 15%, 30%, dan 50% menghasilkan penurunan waktu menjadi 178.67 detik, 154.67 detik, dan 136.00 detik. Nilai tersebut setara dengan 87.73%, 75.94%, dan 66.78% waktu yang dibutuhkan campuran VC untuk mencapai mode puncak. Durasi untuk mencapai mode puncak menurun seiring dengan bertambahnya persentase RB untuk menggantikan VCA di semua campuran w/c 0.52 dan w/c 0.49. Temuan ini menyoroti bahwa agregat kasar RB yang lebih lemah akan mempengaruhi kualitas beton, sehingga memerlukan waktu yang lebih singkat untuk mencapai mode puncak.

2. Mode Ultimate

Untuk w/c 0.52, memerlukan waktu 221.56 detik agar benda uji VC dapat mencapai mode ultimate. Selanjutnya terlihat bahwa campuran beton yang mengadopsi RB dengan variasi 15%, 30%, dan 50% menghasilkan penurunan waktu menjadi 188.92 detik, 169.41 detik, dan 137.10 detik. Nilai tersebut setara dengan 85,26%, 76,46%, dan 61,88% waktu yang dibutuhkan campuran VC untuk mencapai mode ultimate. Untuk w/c 0.49, memerlukan waktu 250.44 detik agar benda uji VC dapat mencapai mode ultimate. Selanjutnya terlihat bahwa campuran beton yang mengadopsi RB dengan variasi 15%, 30%, dan 50% menghasilkan penurunan waktu menjadi 219.71 detik, 198.09 detik, dan 170.56 detik. Nilai ini setara dengan 87.73%, 79.10%, dan 68.10% waktu yang dibutuhkan campuran VC untuk mencapai mode ultimate. Durasi untuk mencapai mode ultimate menurun seiring dengan bertambahnya persentase RB untuk menggantikan VCA di semua campuran w/c 0.52 dan w/c 0.49. Temuan ini menyoroti bahwa agregat kasar RB yang lebih lemah akan mempengaruhi kualitas beton, sehingga memerlukan waktu yang lebih singkat untuk mencapai mode ultimate.



a) w/c 0.52



b) w/c 0.49

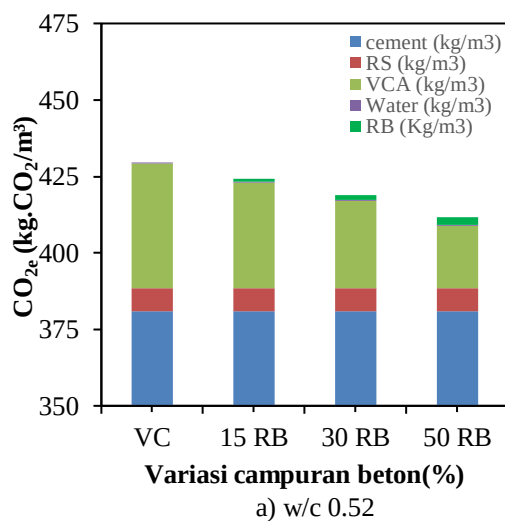
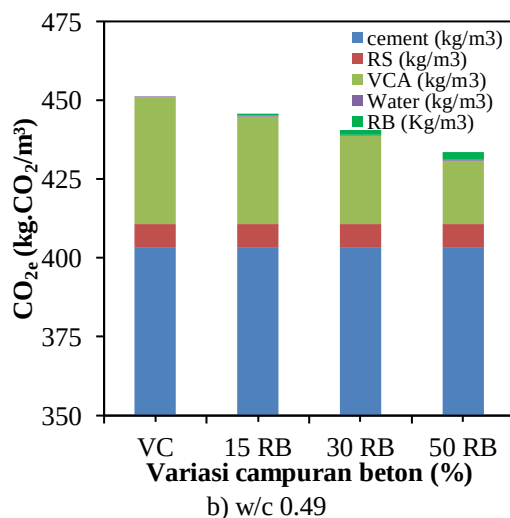
Gambar 7. Hubungan beban tarik dan waktu beton untuk persentase RB yang berbeda

3.5 CO_{2e}

Gambar 8 menunjukkan perubahan CO_{2e} sebagai konsekuensi pengadopsian RB sebagai substitusi VCA. Untuk w/c 0.52, CO_{2e} dari VC sebesar 429.63 kg.CO₂/m³. Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50% sebagai pengganti VCA, nilai CO_{2e} masing-masing menurun menjadi 424.08 kg.CO₂/m³, 418.86 kg.CO₂/m³, dan 411.65 kg.CO₂/m³, yang mana nilai tersebut setara dengan 98.71%, 97.49%, dan 95.81% dibandingkan dengan VC. Untuk w/c 0.49, CO_{2e} dari VC sebesar 451.21 kg.CO₂/m³. Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50% sebagai pengganti VCA, nilai CO_{2e} masing-masing menurun menjadi 445.90 kg.CO₂/m³, 440.59 kg.CO₂/m³, dan 433.51 kg.CO₂/m³,

yang mana nilai tersebut setara dengan 98.82%, 97.65%, dan 96.08% dibandingkan VC.

Penurunan nilai CO_{2e} ini disebabkan oleh CO_{2e} pada RB yang lebih rendah dibandingkan dengan CO_{2e} pada VCA yang dapat dilihat pada tabel 5. Hal ini serupa dengan penelitian terdahulu dari [4], dimana nilai CO_{2e} yang dihasilkannya juga mengalami penurunan setelah memanfaatkan agregat kasar daur ulang. Hal tersebut mengisyaratkan bahwa penggunaan RB dapat menjadi solusi untuk menghasilkan beton ramah lingkungan.

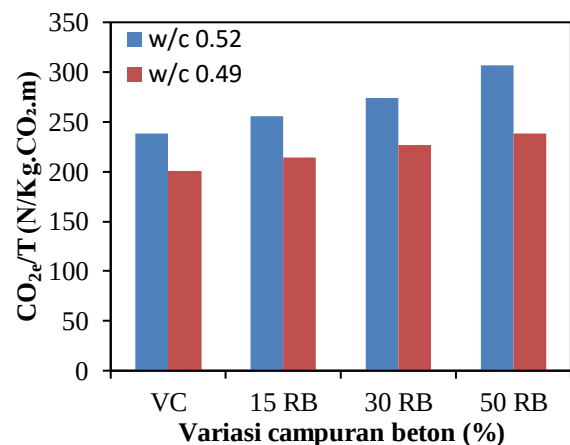


Gambar 8. CO_{2e} beton untuk persentase RB berbeda

3.6 Rasio CO_{2e} terhadap kekuatan tarik (CO_{2e}/T)

Gambar 9 menunjukkan rasio CO_{2e} terhadap kekuatan tarik yang merupakan

konsekuensi pengadopsian RB sebagai substitusi parsial VCA. Untuk w/c 0.52, pada VC adalah 237.96. Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50%, nilai tersebut meningkat masing-masing sebesar 256.07, 274.03, dan 306.66. Terlihat rasio nilai tersebut sebesar 1.08%, 1.15%, dan 1.29%. Sedangkan untuk w/c 0.49, pada VC sebesar 200.91. Setelah mengadopsi RB sebesar 15%, 30%, dan 50%, nilai tersebut meningkat masing-masing sebesar 214.49, 226.46, dan 238.43. Terlihat rasio nilai tersebut sebesar 1.07%, 1.13%, dan 1.19%.



Gambar 9. CO_{2e} terhadap kuat tarik belah beton untuk persentase RB berbeda

Hasil ini seiring dengan penelitian sebelumnya dari [33] yang juga menghasilkan CO_{2e} yang relatif lebih tinggi dibandingkan data total kandungan pengikat, dengan total CO_{2e} diperkirakan antara 100 dan 600 kg.m³. Mereka menjelaskan bahwa adanya beberapa jenis semen, fraksi klinker, dan bahan baku yang berbeda menyebabkan sampel data tidak menunjukkan bukti bahwa CO_{2e} maksimum merupakan fungsi dari akar kuadrat kuat tarik.

3.7 Kriteria Penerimaan

Kriteria penerimaan digunakan untuk menentukan kelayakan pengadopsian RB sebagai pengganti batu pecah alami. Penelitian ini menganut kriteria SAI, sehingga derajat kuat tarik belah yang dihasilkan benda uji yang mengandung RB tidak boleh kurang dari 85% dibandingkan beton standar. Hal ini

sesuai dengan spesifikasi dari [35] dan penelitian terdahulu dari [43].

Tabel 6 menunjukkan analisis kriteria penerimaan berdasarkan kekuatan tarik. Untuk w/c 0.52, terlihat bahwa kuat tarik belah campuran beton yang mengadopsi RB sebesar 15% mempunyai nilai yang tidak kurang dari 85% dibandingkan beton kontrol. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada w/c 0.52, campuran yang dirancang dengan pengadopsian RB dalam variasi 15% berfungsi sebagai alternatif batu pecah alami sesuai kriteria. Selanjutnya untuk w/c 0.49, setiap campuran yang mengadopsi RB sebesar 15% dan 30% sebagai batu pecah alami mempunyai nilai tidak kurang dari 85% dibandingkan beton kontrol. Temuan ini merupakan bukti bahwa campuran yang dikembangkan dengan w/c 0.49 mencapai kriteria penerimaan untuk penempatan RB dalam variasi 15% dan 30% sebagai bandingan batu pecah alami.

Tabel 7 menunjukkan analisis kriteria penerimaan rasio CO_2e terhadap kekuatan tarik. Untuk w/c 0.52, terlihat bahwa pengadopsian RB sebesar 15%, 30%, dan 50% memberikan nilai 107,61, 115,16, dan 128,87 dibandingkan beton kontrol. Nilai tersebut setara dengan nilai delta sebesar 6,8%, 12,7%, dan 18,7%. Untuk w/c 0.49 terlihat bahwa pengadopsian RB sebesar 15%, 30%, dan 50% memberikan nilai sebesar 106,76, 112,72, dan 118,68 dibandingkan beton kontrol. Nilai tersebut setara dengan nilai delta sebesar 6,8%, 12,7%, dan 18,7%.

Namun berdasarkan analogi SAI, penelitian ini memberikan batas selisih maksimal sebesar 20% untuk dinyatakan memberikan manfaat sehingga dapat diterima untuk digunakan dalam praktik beton.

Tabel 6 Analisis kriteria penerimaan berdasarkan kekuatan tarik

Penamaan Campuran Beton	VCA	RB	w/c (%)	Kuat tarik belah	SAI
VC	100	0		1.81	100
15% RB	85	15	0.52	1.66	91.73
30% RB	70	30		1.53	84.66

50% RB	50	50		1.34	74.35
VC	100	0		2.25	100
15% RB	85	15	0.49	2.08	92.56
30% RB	70	30		1.95	86.63
50% RB	50	50		1.82	80.95

Tabel 7 Analisis kriteria penerimaan rasio CO_2e terhadap kekuatan tarik

Penamaan Campuran Beton	VCA	RB	w/c (%)	CO_2e/T	SAI
VC	100	0		237.96	100
15% RB	85	15	0.52	256.07	107.61
30% RB	70	30		274.03	115.16
50% RB	50	50		306.66	128.87
VC	100	0		200.91	100
15% RB	85	15	0.49	214.49	106.76
30% RB	70	30		226.46	112.72
50% RB	50	50		238.43	118.68

4. Kesimpulan

- Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan dan kuat tarik belah beton mengalami penurunan seiring dengan peningkatan persentase pengadopsian RB. Pada campuran w/c 0.52 dan w/c 0.49, penurunan campuran beton terendah dicapai pada variasi campuran beton RB 15%.
- Dibandingkan dengan VC, semua kurva hubungan beban tarik terhadap waktu untuk sampel yang mengadopsi RB menunjukkan nilai yang lebih rendah untuk mencapai mode puncak dan mode ultimate.
- Dari kerangka mix design pengadopsian RB sebesar 15%, 30%, dan 50% menurunkan CO_2e secara keseluruhan, namun dari segi perbandingan rasio CO_2e terhadap kekuatan tarik, penggunaan RB memberikan dampak lingkungan yang negatif pada rasio CO_2e terhadap kekuatan tarik.
- Dari hasil kriteria penerimaan dengan penambahan RB, pada kuat tarik belah menunjukkan bahwa campuran yang

didesain dengan adopsi RB variasi 15% dapat berfungsi sebagai alternatif pengganti VCA pada campuran beton. Adapun kriteria penerimaan CO_{2e} terhadap kekuatan tarik yang berdasarkan analogi SAI, penelitian ini memberikan batas selisih maksimal sebesar 20% untuk dinyatakan memberikan manfaat sehingga dapat diterima untuk digunakan dalam praktek nyata.

5. Saran

Diperlukan penjelasan mengenai skenario riwayat beban tarik yang digunakan (monotonik/siklik/tertahan), menstandarkan desain campuran dengan variasi kadar bata kromium–ferit–magnesia dan kontrol variabel (w/c, curing), melakukan karakterisasi material serta uji tarik yang reliabel disertai analisis retak dan statistik, sekaligus menghitung emisi CO₂ dengan batas sistem LCA yang jelas (termasuk sensitivitas transport/energi) serta memperhatikan aspek keselamatan/potensi pelindian kromium.

6. Daftar Pustaka

- [1] L. S. Silva, M. Amario, C. M. Stolz, K. V. Figueiredo, and A. N. Haddad, “A Comprehensive Review of Stone Dust in Concrete: Mechanical Behavior, Durability, and Environmental Performance,” *Buildings*, vol. 13, no. 7, 2023, doi: 10.3390/buildings13071856.
- [2] R. C. Hackney *et al.*, “River bank instability from unsustainable sand mining in the lower Mekong River,” *J. Clean. Prod.*, pp. 0–48, 2019.
- [3] K. Rashid, A. Razzaq, M. Ahmad, T. Rashid, and S. Tariq, “Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 829–840, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.219.
- [4] M. Batikha, S. T. M. Ali, A. Rostami, and M. Kurtayev, “Using recycled coarse aggregate and ceramic waste to produce sustainable economic concrete,” *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 785–799, 2021, doi: 10.1080/19397038.2020.1862353.
- [5] H. Fang, J. D. Smith, and K. D. Peaslee, “Study of spent refractory waste recycling from metal manufacturers in Missouri,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 25, no. 2, pp. 111–124, 1999, doi: 10.1016/S0921-3449(98)00059-7.
- [6] L. Horckmans, P. Nielsen, P. Dierckx, and A. Ducastel, “Recycling of Refractory Bricks Used in Basic Steelmaking: A Review,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 140, no. May 2018, pp. 297–304, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.09.025.
- [7] Z. Jwaide, A. Dulaimi, and L. F. A. Bernardo, “The Use of Waste Ceramic in Concrete: A Review,” Jun. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/civileng5020024.
- [8] A. A. Hashim, R. Anaee, and M. S. Nasr, “Improving the Mechanical, Corrosion Resistance, Microstructural and Environmental Performance of Recycled Aggregate Concrete Using Ceramic Waste Powder as an Alternative to Cement,” *Ceramics*, vol. 8, no. 1, Mar. 2025, doi: 10.3390/ceramics8010011.
- [9] C. Li, X. Zhang, X. Cao, and Y. Yu, “Sustainable Performance and Interfacial Characteristics of Fully Recycled Concrete with Combined Recycled Concrete, Brick, and Ceramic Aggregates,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 23, Dec. 2025, doi: 10.3390/su172310503.
- [10] S. Ghosh and A. K. Samanta, “Utilization of recycled refractory brick

- as fine aggregate on various properties of sustainable concrete,” *Mater. Today Proc.*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.712.
- [11] S. Sinha, S. Ghosh, and A. K. Samanta, “Influence of waste refractory brick on the destructive and non-destructive properties of sustainable eco-friendly concrete,” *Mater. Today Proc.*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.508.
- [12] L. Horckmans, P. Nielsen, P. Dierckx, and A. Ducastel, “Recycling of refractory bricks used in basic steelmaking: A review,” Jan. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.resconrec.2018.09.025.
- [13] M. Nath, S. Song, A. M. Garbers-Craig, and Y. Li, “Phase evolution with temperature in chromium-containing refractory castables used for waste melting furnaces and Cr(VI) leachability,” *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 16, pp. 20391–20398, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.08.032.
- [14] R. Gettu, R. G. Pillai, M. Santhanam, A. S. Basavaraj, S. Rathnarajan, and B. S. Dhanya, “Sustainability-based decision support framework for choosing concrete mixture proportions,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 51, no. 6, Dec. 2018, doi: 10.1617/s11527-018-1291-z.
- [15] J. W. Choi, D. K. Suh, T. K. Ki, and M. C. Han, “A Proposal of Evaluation Method for Blended Cement Based on CO₂ Emissions and Compressive Strength,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 20, no. 1, Dec. 2026, doi: 10.1186/s40069-025-00865-2.
- [16] Badan Standardisasi Nasional, “Semen Portland Komposit, SNI 7064:2014,” *Badan Standardisasi Nasional*, pp. 1–128, 2014.
- [17] SNI 03-2834-2000, “SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal,” *Sni 03-2834-2000*, pp. 1–34, 2000.
- [18] A. Estokova, L. Palascakova, and M. Kanuchova, “Study on Cr(VI) leaching from cement and cement composites,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.3390/ijerph15040824.
- [19] J. D. Majer, J. H. C. Delabie, and N. L. McKenzie, “The use of recycled aggregate from waste refractory brick for the future of sustainable concrete,” *Insectes Soc.*, vol. 1, no. 1, pp. 255–266, 2021.
- [20] P. By, V. Cervantes, and J. Roesler, “Performance of Concrete Pavements,” vol. 4, no. 09, pp. 79–94, 2009.
- [21] Badan Standardisasi Nasional, “Semen Portland Komposit, SNI 7064:2014,” *Badan Standardisasi Nasional*, pp. 1–128, 2014.
- [22] ASTM C127-88, “Standard Test Method for Specific Gravity and Water Absorption of Coarse Aggregate,” *American Society of Testing Materials*, vol. 04, no. Reapproved, pp. 1–5, 2001.
- [23] ASTM-C-128, “Designation: C128-07a Standard Test Method for Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate of Fine Aggregate 1 1,” pp. 1–7, 2010.
- [24] B. Statements and T. Size, “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,” *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04, no. 571, pp. 5–9, 2011.
- [25] ASTM C131/C131M-14, “C131/C131M-14 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine,” *Annual Book of American*

- Society for Testing materials ASTM Standards, West Conshohocken, USA*, vol. 04, no. Note 2, pp. 5–8, 2014, doi: 10.1520/C0131.
- [26] ASTM C143/C143M-12, “Standard Test Method for,” *Manual on Hydrocarbon Analysis, 6th Edition*, pp. 545-545-3, 2008, doi: 10.1520/mnl10913m.
- [27] A. C. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, “ASTM C 39/C 39M – 01. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” *ASTM C 39/C 39M – 01. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, pp. 3–9, 2014, doi: 10.1520/C0039.
- [28] C. 496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, “ASTM C 496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” *ASTM C 496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, pp. 2–6, 2009.
- [29] M. A. Caronge, M. W. Tjaronge, I. R. Rahim, R. Irmawaty, and F. E. P. Lapien, “Feasibility study on the use of processed waste tea ash as cement replacement for sustainable concrete production,” *Journal of Building Engineering*, vol. 52, no. March, p. 104458, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104458.
- [30] T. P. Huynh, L. S. Ho, and Q. Van Ho, “Experimental investigation on the performance of concrete incorporating fine dune sand and ground granulated blast-furnace slag,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 347, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128512.
- [31] G. Long, Y. Gao, and Y. Xie, “Designing more sustainable and greener self-compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 84, pp. 301–306, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.072.
- [32] H. S. Müller, M. Haist, and M. Vogel, “Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, no. PART C, pp. 321–337, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.039.
- [33] B. L. Damineli, F. M. Kemeid, P. S. Aguiar, and V. M. John, “Measuring the eco-efficiency of cement use,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 8, pp. 555–562, 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009.
- [34] R. T. Thorstensen and P. Fidjestol, “Inconsistencies in the pozzolanic strength activity index (SAI) for silica fume according to EN and ASTM,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 48, no. 12, pp. 3979–3990, 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0457-6.
- [35] ASTM C 311-04, “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete,” *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02, pp. 204–212, 2005.
- [36] Y. N. Sheen, H. Y. Wang, Y. P. Juang, and D. H. Le, “Assessment on the engineering properties of ready-mixed concrete using recycled aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 45, pp. 298–305, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.072.
- [37] X. Liu, J. Wu, X. Zhao, P. Yan, and W. Ji, “Effect of brick waste content on mechanical properties of mixed recycled concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 292, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123320.

- [38] M. C. S. Nepomuceno, R. A. S. Isidoro, and J. P. G. Catarino, "Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 284–294, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.052.
- [39] Y. Ji, D. Wang, and L. Wang, "Numerical and Experimental Investigation of Recycled Brick Coarse Aggregate Concrete," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 18, 2022, doi: 10.3390/app12189035.
- [40] M. Gomes, J. de Brito, and M. Bravo, "Mechanical Performance of Structural Concrete with the Incorporation of Coarse Recycled Concrete and Ceramic Aggregates," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, no. 10, 2014, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000973.
- [41] J. S. González, F. L. Gayarre, C. L. C. Pérez, P. S. Ros, and M. A. S. López, "Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams," *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, no. 2017, pp. 507–514, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.147.
- [42] L. Berredjem, N. Arabi, and L. Molez, "Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 246, p. 118421, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118421.
- [43] N. Sachdeva, N. Shrivastava, and S. Shrivastava, "Pozzolanic reaction and strength activity index of dolomite powder incorporated cement mortar," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.042.