

TESIS

**PERILAKU LENTUR BALOK TERHADAP PENGGUNAAN
LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA
SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT KASAR**

*Flexural Behavior of Beams Utilizing Magnesita Type
Refractory Brick Waste as a Substitute for Coarse Aggregate*

ERWIN HAFID

D012221013



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PENGAJUAN TESIS

**PERILAKU LENTUR BALOK TERHADAP PENGGUNAAN LIMBAH
BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGGANTI
AGREGAT KASAR**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

ERWIN HAFID

D012221013

Kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

**PERNYATAAN KEASLIAN TESIS
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Erwin Hafid
Nomor mahasiswa : D012221013
Program studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Perilaku lentur balok terhadap penggunaan limbah batu bata tahan api tipe magnesita sebagai pengganti agregat kasar” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng dan Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng. Karya ilmiah ini belum pernah diajukan ke perguruan tinggi mana pun dalam bentuk apa pun. Semua informasi yang diambil dari karya yang diterbitkan atau tidak diterbitkan dari penulis lain telah diakui dalam teks dan tercantum dalam daftar pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah diproses di *Asian Journal of Civil Engineering TRANSACTIONS A: Basics* dengan status *under review (revisi on stage)* sebagai artikel dengan judul “*Modulus of Rupture of Rectangular Beam Specimens Composed of Dismantled Magnesita Refractory Brick as Coarse Aggregate.*”

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 06 Mei 2024

Yang menyatakan,



Erwin Hafid

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang maha penyayang karena atas limpahan rahmat-Nya, sehingga allhamdulillah penulis dapat menyelesaikan penyusunan hasil Tesis ini, Dalam Laporan hasil Tesis ini, kami akan membahas mengenai :
“PERILAKU LENTUR BALOK TERHADAP PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT KASAR”

Kami menyampaikan penghargaan sangat tinggi dan mendalam kepada kepada berbagai pihak yang telah membantu melewati semua proses penyusunan Tesis ini, terima kasih kepada:

1. **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.**, selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. **Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT, IPM, ASEAN.Eng.** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Dr. Ir. Muh. Asad Abdurrahman, ST., M.Eng. PM, IPM** Selaku Ketua Program studi S2 Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
4. **Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng** selaku pembimbing I yang selalu memberikan arahan dan petunjuk dalam penyusunan Tesis ini.
5. **Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng** selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan pengarahan dalam proses penyusunan Tesis ini.
6. **Prof. Dr. Ing. Herman Parung., M.eng, Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT, Dr. Eng. Fakhruddin, ST., M.Eng** selaku penguji.
7. **Prof. Dr. Eng. Ir. Rudy Djamaluddin, ST, M. Eng.** selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
8. Seluruh dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
9. **Teman-teman laboratorium riset *eco-material* (dek pororo, dek deti, dek vira, dek niar, dek zair, dek risal, dek komang, dek haerul, dek andre, dek hikmah, dek jendri, dek inul, kak iin, kak gery, kak azwar,)** dan laboran laboratorium struktur dan bahan yang turut membantu dalam proses penelitian.
10. Teman – teman **angkatan 20221** terkhusus magister KKD struktur yang telah memberikan dukungan dan dorongan selama masa studi.

11. Pihak – pihak lain yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu yang telah memberikan sedikit atau banyak andil dan doa kepada saya dalam menyelesaikan penulisan Tesis ini. Saya ucapkan banyak terima kasih

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Orangtuaku yang tercinta dan sangat kusayangi, dengan penghargaan tertinggi saya sebutkan dengan hormat nama kedua orang tua saya, yaitu **Bapak (Almarhum Abdul Hafid)** dan **Ibu (Hj.Sitti Aisyah)**. Terima kasih banyak atas doa, kasih sayang, nasehat, dan segala dukungan yang telah diberikan sampai saat ini dan nanti. Mudah – mudahan Erwin bisa menjadi anak sholehah dan berbakti kepada kedua orang tua, serta dapat bapak ibu banggakan di dunia dan akhirat, aamiin.
2. Ketiga adik tersayang yaitu **Erwan Hafid,S.Pd.,M.Pd.,Gr**, **Ervina Hafid**, dan **Bella Eka Cahyanti Hafid** Terima kasih telah menjadi orang-orang yang turut menguatkan Erwin dalam menjalani kehidupan, semangat, doa, dan dukungan lainnya yang turut membantu dalam penyelesaian tesis ini. Semoga kita bersaudara sukses di dunia dan akhirat, aamiin.
3. **Komang Saka Suwindu**, sahabatku yang sangat membantu Erwin menjalani kehidupan magister. Kata andalannya “Apa Lagi Kak”.
4. **Muh.Fazil**, sahabatku yang sangat membantu Erwin menjalani kehidupan magister. Kata andalannya “Gampang Itu Kak”.
5. **Ir. Nidia Islamiah, ST., M. Ars., IPP**, Masa depanku yang sangat membantu Erwin menjalani kehidupan magister. Kata andalannya “Sabarki Selesaiji itu”.
6. Hadist penyemangat selama studi: “**Barangsiapa yang menempuh suatu jalan untuk mencari ilmu, maka Allah memudahkan untuknya jalan menuju surga.**” (HR. Muslim, 2699), dalam hal ini diutamakan ilmu agama kemudian ilmu duniawi yang bermanfaat untuk kehidupan manusia.

Kami menyadari bahwa masih banyak kekurangan pada tesis ini. Oleh karena itu saran serta kritik yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan guna penyempurnaan penulisan Tesis.

Demikian Tesis ini kami buat, semoga dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Gowa, 06 Mei 2024

Penulis,

Erwin Hafid

LEMBAR PENGESAHAN**TESIS****PERILAKU LENTUR BALOK TERHADAP
PENGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API
TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGANTI AGREGAT****ERWIN HAFID****D012221013**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 30 April 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr.Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng
NIP. 198604092019043001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr.Ir.H.M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng
NIP. 196805292002121002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr.Eng.Ir. Muhammad Isran Ramli, ST. MT.IPM
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil

Dr.Ir.M.Asad Abdurrahman, ST. M.Eng.PM.IPM
NIP. 197303061998021001

ABSTRAK

Erwin Hafid. Perilaku lentur balok terhadap penggunaan limbah batu bata tahan api tipe magnesita sebagai pengganti agregat kasar (dibimbing oleh **Muhammad Akbar Caronge dan Muhammad Wihardi Tjaronge**)

Salah satu permasalahan global yang saat ini menarik perhatian adalah pengelolaan limbah industri, dan salah satu aspek yang memerlukan perbaikan adalah penanganan limbah batu bata tahan api. Limbah batu bata merupakan salah satu jenis sampah yang tidak dapat terurai secara alami dan membutuhkan waktu yang lama untuk terurai, sehingga mendaur ulangnya merupakan tantangan yang sulit. Oleh karena itu, banyak penelitian telah dilakukan untuk mengeksplorasi penggunaan kembali bahan limbah tersebut dalam pengembangan beton berkelanjutan. Penelitian ini merupakan hasil dari investigasi eksperimental mengenai penggunaan limbah batu bata tahan api (RB) sebagai pengganti agregat kasar dalam produksi beton berkelanjutan. Dalam kerangka penelitian ini, telah disiapkan empat variasi campuran beton yang berbeda, dengan dua perbandingan terhadap bahan pengikat (w/c) sebesar 0,52 dan 0,49 serta penggunaan RB sebagai pengganti sebagian Batu Pecah (BS) pada campuran 0%, 15%, 30%, dan 50%. Sifat-sifat seperti kemampuan kerja, kuat lentur, kuat tekan, dan hubungan antara tegangan lentur dan lendutan telah diperiksa dalam percobaan ini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan persentase RB yang digunakan dalam campuran beton memberikan kontribusi positif terhadap kemampuan kerja beton. Selain itu, penelitian ini mencatat pengaruh terhadap kekuatan lentur dari hubungan antara tegangan lentur dan lendutan, yang bervariasi dengan penambahan RB. Penelitian ini juga mencatat bahwa penggunaan agregat bata tahan api daur ulang mengurangi nilai kecepatan rambat gelombang ultrasonik (UPV) pada beton, namun hasil UPV berada dalam kisaran yang dapat diterima. Hal ini menunjukkan potensi penggunaan RB dalam pembuatan beton berkelanjutan memiliki kualitas yang cukup baik.

Keywords: Batu bata tahan api (RB), Kuat lentur, UPV, Beton berkelanjutan.

ABSTRAK

Erwin hafid. Flexural Behavior of the Beam towards the Use of Magnesia Type Refractory Brick Waste as A Substitute for Coarse Aggregate (supervised by **Muhammad Akbar Caronge dan Muhammad Wihardi Tjaronge**)

One of the pressing global challenges currently in focus is the management of industrial waste, with a particular emphasis on the handling of refractory brick waste. This type of waste poses a significant disposal issue due to its non biodegradable nature, necessitating lengthy periods to decompose, making recycling efforts particularly challenging. As a result, extensive research has been conducted to investigate the potential for repurposing such waste materials in the development of sustainable concrete solutions. This research presents the findings from an experimental investigation into the utilization of refractory brick (RB) waste as an alternative to coarse aggregate in the production of sustainable concrete. The study involved the preparation of four different concrete mix variations, featuring two binder (water-to-cement, w/c) ratios of 0.52 and 0.49, and incorporating RB as a partial replacement for crushed stone (BS) at 0%, 15%, 30%, and 50% substitution levels. The experiments assessed various properties, including workability, flexural strength, compressive strength, and the correlation between bending stress and deflection. The results indicate that incorporating an increasing proportion of RB into the concrete mixture significantly enhances its workability. Moreover, the study observed a notable effect on flexural strength attributed to the relationship between bending stress and deflection, which varied with the addition of RB. Additionally, the research highlights that the use of recycled refractory brick aggregate decreases the ultrasonic pulse velocity (UPV) in concrete; however, the UPV values remain within acceptable limits. These findings underscore the potential viability of using RB in the creation of sustainable concrete, demonstrating its substantial quality.

Keywords: Refractory bricks (RB), Flexural strength, UPV, Sustainable concrete.

DAFTAR ISI

TESIS	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	5
I.3 Tujuan Penelitian	5
I.4 Manfaat Penelitian	5
I.5 Ruang Lingkup	5
I.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
II.1 Beton	8
II.2 Bahan Penyusun Beton	8
II.2.1 Beton	8
II.2.2 Agregat.....	11
II.2.3 Refractory Brick (RB).....	15
II.3 Sifat Mekanik Beton.....	16
II.3.1 Kuat Tekan Beton	16

II.3.2	Kuat Lentur Beton.....	17
II.4	Pengujian UPV Beton.....	18
II.5	Porositas Beton	19
II.6	Densitas.....	20
II.7	Lendutan / Defleksi.....	21
II.8	Penelitian Terdahulu.....	22
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	25
III. 1	Tahapan penelitian	25
III. 2	Tempat dan waktu Penelitian.....	26
III. 3	Jenis dan sumber penelitian.....	27
III. 4	Alat dan bahan penelitian	27
IV.1	Alat.....	27
IV.2	Bahan.....	28
III. 5	Pemeriksaan Karakteristik Material.....	29
III. 6	Analisa perancangan campuran (<i>Mix design</i>).....	29
III. 7	Pembuatan benda uji.....	30
III. 8	Pemeriksaan uji slump beton.....	32
III. 9	Perawatan benda uji.....	33
III. 10	Pengujian benda uji	34
III.10.1	Uji kuat tekan silinder	34
III.10.2	Uji kuat lentur.....	35
III.10.3	Uji ultrasonic pulse velocity (UPV)	35
III.10.4	Pengujian densitas	36
III.10.5	Pengujian porositas beton.....	37
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHAAN	38
IV.1	Karakteristik material.....	38

IV.2	Slump beton.....	40
IV.3	Kuat tekan beton.....	43
IV.4	Kuat lentur beton.....	44
IV.5	Hubungan kuat tekan dan lentur	47
IV.6	Beban dan lendutan	48
IV.7	Beban Puncak.....	50
IV.8	Lendutan Puncak.....	52
IV.9	Ultrasonic pulse velocity (UPV).....	53
IV.10	Porositas beton	55
IV.11	Densitas beton	58
IV.12	Patahan	59
IV.13	Distribusi Agregat.....	61
IV.14	Analisis Mikrostruktur ITZ.....	63
IV.15	Kebaruan Penelitian dari penelitian sebelumnya.....	65
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		66
V.1	Kesimpulan	66
V.2	Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA		67
LAMPIRAN.....		73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Patah pada bentang 1/3 bentang tengah.....	17
Gambar 2 Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang	18
Gambar 3 Skematik pengujian Ultrasonik Pulse Velocity (UPV)	19
Gambar 4 Diagram alir penelitian	26
Gambar 5 Material Campuran Beton.....	29
Gambar 6 Benda Uji Silinder 10x20 cm	31
Gambar 7 Benda Uji Balok 40x10x10 cm.....	32
Gambar 8 Proses pembuataatan benda uji.....	32
Gambar 9 Pemeriksaan Uji Slump Beton.....	33
Gambar 10 Proses Curring Dalam Bak Perendam	33
Gambar 11 Universal Testing Machine.....	34
Gambar 12 Data Logger dan Laptop	34
Gambar 13 Pengujian Kuat Tekan Beton.....	35
Gambar 14 Pengujian Kuat Lentur Beton	35
Gambar 15 Pengujian UPV Balok.....	36
Gambar 16 Pengujian Densitas.....	36
Gambar 17 Pengujian Porositas.....	37
Gambar 18 Gradasi agregat halus dan agregat kasar.....	40
Gambar 19 Hasil uji slump beton segar dari campuran beton dengan persentase penggunaan RB yang berbeda.....	40
Gambar 20 Tampilan visual hasil uji slump beton segar	41
Gambar 21 Kuat tekan beton.....	43
Gambar 22 Kuat lentur beton untuk persentase penggunaan RB yang berbeda .	44
Gambar 23 Hubungan antara kuat tekan dengan kuat lentur.....	47
Gambar 24 Grafik gabungan hubungan beban dan lendutan dengan presentase penggunaan MRB yang berbeda untuk target mutu $f'c = 21$ MPa	48
Gambar 25 Grafik gabungan hubungan beban dan lendutan rata-rata dengan presentase penggunaan MRB yang berbeda untuk target mutu $f'c = 21$ MPa.....	48
Gambar 26 Grafik gabungan hubungan beban dan lendutan dengan presentase penggunaan MRB yang berbeda untuk target mutu $f'c = 25$ MPa	49

Gambar 27 Grafik gabungan hubungan beban dan lendutan rata-rata dengan presentase penggunaan MRB yang berbeda untuk target mutu $f'c = 25$ MPa.....	49
Gambar 28 Grafik beban puncak dengan presentase penggunaan MRB yang berbeda	51
Gambar 29 Grafik lendutan puncak dengan presentase penggunaan MRB yang berbeda	52
Gambar 30 Grafik hasil pengujian ultrasonic pulse velocity (UPV).....	54
Gambar 31 Grafik hasil pengujian porositas beton	56
Gambar 32 Grafik hasil pengujian berat jenis beton	58
Gambar 33 Hasil pengujian kuat lentur dengan mutu beton $f'c = 21$ MPa	60
Gambar 34 Hasil pengujian kuat lentur dengan mutu beton $f'c = 25$ MPa	60
Gambar 35 Distribusi Agregat $f'c$ 21 Mpa.....	61
Gambar 36 Distribusi Agregat $f'c$ 25 Mpa	62
Gambar 37 Hasil pengujian SEM beton (CC).....	64
Gambar 38 Hasil pengujian SEM beton MRB 15%.....	65

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Syarat Gradasi Agregat Sesuai ASTM C 33-03 (2003)	13
Tabel 2 Gradasi Agregat Halus	15
Tabel 3 Standar rujukan pemeriksaan karakteristik agregat.....	29
Tabel 4 Komposisi beton mix design ($f'c$).....	30
Tabel 5 Identifikasi Pembuatan Benda Uji.....	31
Tabel 6 Karakteristik Agregat Kasar Batu Bata Tahan Api (<i>Refraktori Brick</i>) Tipe Magnesia	38
Tabel 7 Karakteristik Agregat Kasar Batu Pecah.....	39
Tabel 8 Karakteristik Agregat Halus (Pasir)	39
Tabel 9 Rekapitulasi pengujian slump beton.....	41
Tabel 10 Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton	43
Tabel 11 Rekapitulasi hasil pengujian kuat lentur beton.....	45
Tabel. 12 Klasifikasi jalan berdasarkan SKh.(1.5.24.2.1) dan (16.1/SE/Db/2020)	46
Tabel. 13 rekapitulasi Spesifikasi Jalan berdasarkan pengujian kuat lentur	46
Tabel 14 Rekapitulasi hasil pengujian beban puncak beton.....	51
Tabel 15 Rekapitulasi hasil pengujian lendutan puncak beton	52
Tabel 16 Klasifikasi kualitas beton berdasarkan kecepatan gelombang	53
Tabel 17 Rekapitulasi hasil pengujian UPV beton.....	54
Tabel 18 Rekapitulasi hasil pengujian porositas beton	56
Tabel 19 Rekapitulasi hasil pengujian berat jenis beton	58
Tabel 20 Distribusi Agregat Beton $f'c$ 21 MPa.....	62
Tabel 21 Distribusi Agregat Beton $f'c$ 25 MPa.....	63

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Singkatan/symbol	Arti dan keterangan
RB	= limbah batu bata tahan api atau <i>refractory brick</i>
MRB	= Batu bata tahan api tipe magnesia atau <i>Magnesia Refractory Brick</i>
BS	= Batu pecah atau <i>Broken stone</i>
w/c	= rasio air/semen
PCC	= <i>portland composite cement</i>
f'c	= kuat tekan beton benda uji silinder (MPa atau N/mm ²)
P	= Beban maksimum total (N)
A	= luas penampang melintang benda uji (mm ²)
σ_1	= kuat lentur (N/mm ²)
L	= Panjang bentang (mm)
b	= Lebar benda uji (mm)
d	= Tebal benda uji (mm)
a	= Jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan terdekat diukur pada bagian tarik spesimen.
V	= <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (km/s)
L	= Jarak antara pusat permukaan transduser (m)
T	= Waktu tempuh (s)
ρ	= Porositas beton (%)
W _{ssd}	= Berat kering permukaan jenuh (gram)
W _{ad}	= Berat Kering Oven (gram)
W _w	= Berat Sampel dalam air (gram)
D	= Densitas beton (kg/m ³)
M _c	= Berat wadah ukur yang diisi beton (kg)
M _m	= Berat wadah ukur (kg)
V _m	= Volume wadah ukur (m ³)
UPV	= <i>Ultrasonik Pulse Velocity</i>
UTM	= <i>universal testing machine</i>
SNI	= standar nasional indonesia
ASTM	= <i>american society for testing and materials</i>

CC	=	beton kontrol
SEM	=	<i>scanning electron microscopy</i>
ITZ	=	<i>interfacial transition zone</i>
C – S – H	=	kalsium silikat hidrat
LVDT	=	<i>(Linier Variable Displacement Tranducer)</i>

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Perkembangan zaman era globalisasi yang semakin maju menimbulkan perkembangan industri konstruksi yang semakin pesat. Perkembangan industri konstruksi diperlukan agar kebutuhan akan bahan yang dibutuhkan tersedia dengan mudah dan cepat. Beton adalah salah satu teknologi konstruksi dalam disiplin ilmu bahan yang selalu berkembang hingga saat ini. Menurut SNI 2847 (2019), beton didefinisikan sebagai campuran dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan hidrolis (*portland cement*), agregat kasar, agregat halus, dan air dengan atau tanpa menggunakan bahan tambah (*admixture* atau *additive*). Beton merupakan bahan bangunan yang paling umum digunakan di seluruh dunia dengan produksi globalnya bisa mencapai 7 miliar meter kubik setiap tahunnya. Hal ini menjadikannya sebagai bahan konstruksi terbanyak kedua yang digunakan setelah air Roskos et al., (2011). Produksi beton menghabiskan agregat alami dalam jumlah besar yang akan berdampak serius terhadap lingkungan. Dalam situasi seperti ini solusi alternatif untuk melindungi sumber daya alam dan meningkatkan kesadaran lingkungan yaitu diperkenalkannya konsep keberlanjutan yang kemudian melibatkan penggunaan bahan limbah dalam produksi beton agar lebih ramah lingkungan dan ekonomis. Misalnya, batu bata tahan api yang merupakan salah satu bahan limbah yang dapat digunakan dalam pembuatan beton setelah beberapa kali digunakan di berbagai industri termal.

Batu bata tahan api merupakan material yang mampu menahan suhu tinggi. Batu bata tahan api dipasang pada dinding dan lantai tungku pembakaran untuk memberikan insulasi termal yang baik. Batu bata tahan api pada umumnya dibongkar pada akhir masa pakainya dan diganti dengan yang baru. Dalam hal ini, sekitar 28 juta ton limbah batu bata tahan api dihasilkan setiap tahunnya, dan jumlah besar limbah dihasilkan ketika batu bata tahan api tersebut dipindahkan dan dibuang Hchemi et.al, (2022). Sebagian besar limbah ini, hampir 99%, berakhir di tanah sehingga menyebabkan kerusakan pada keanekaragaman hayati Ghosh and Samanta, (2023). Oleh karena itu, daur ulang RB merupakan solusi ramah lingkungan yang dapat menggantikan agregat alami.

Salah satu Batu bata tahan api yang paling sering digunakan adalah batu bata tahan api jenis magnesia dengan aplikasi pada industri baja (konverter, tanur busur listrik, ladle), industri semen (zona panas tanur putar), industri tembaga (konverter, flash smelter) dan industri kaca (recuperator). Hal ini juga tercermin dari besarnya porsi konsumsi bahan baku *refraktori* global (26%). Batu bata Magnesia-karbon (MgO-C) merupakan salah satu batu bata tahan api pertama yang didaur ulang sejak pertengahan tahun 90an Horckmans et al., (2019).

Lapisan kerja EAF hampir seluruhnya terdiri dari batu bata MgO-C, dengan hanya sejumlah kecil batu bata Alumina-MgO-C (AMC) yang ada di bagian bawah. Selain itu, batu bata MgO-C yang digunakan menunjukkan lebih sedikit kontaminasi karena karakteristik *refraktori* yang mengandung karbon tidak dapat membasahi, sehingga pada dasarnya tidak ada penetrasi terak. Dengan demikian, EAF merupakan sumber *refraktori* MgO-C bekas yang relatif bersih, yang dikombinasikan dengan masa pakai lapisan EAF yang relatif singkat (dalam hitungan minggu) dan tingginya nilai MgO dan grafit, menjelaskan minat terhadap MgO-C. Batu bata MgO-C yang diproduksi ulang yang mengandung hingga 30% bahan daur ulang ternyata memiliki sifat yang hampir sama dengan batu bata MgO-C kualitas rendah, sehingga menawarkan potensi untuk membuat berbagai tingkatan batu bata yang diproduksi ulang sesuai dengan kemurnian MgO dan grafit. dalam bahan daur ulang Horckmans et al., (2019).

MgO-C yang diproduksi ulang digunakan dalam layanan sebenarnya sebagai pengganti batu bata MgO-C bermutu rendah dengan daya tahan yang sama. (Arianpour, Kazemi and Fard, 2010) mempelajari sifat batu bata MgO yang dibakar dan campuran serudukan monolitik yang mengandung 10–30% berat agregat MgO-C daur ulang dari EAF dan sendok dan tidak menemukan perbedaan signifikan dalam komposisi kimia antara *refraktori* baru dan bekas. Othman and Nour, (2005) menyiapkan *refraktori* magnesia berkualitas baik dari batu bata magnesia bekas dengan penambahan zirco-nium-aluminosilicate (ZAS) bekas dan menemukan bahwa penambahan hingga 5 wt.%ZAS mempunyai efek positif pada densifikasi melalui pembentukan fase tahan api tinggi (larutan padat $MgAl_2O_4$ spinel dan $MgO.ZrO_2$). Kepadatan curah meningkat dengan meningkatnya penambahan ZAS dari 2,8 g/cm³ menjadi 3,2 g/cm³ pada 10% berat ZAS (suhu pembakaran 1550 °C). Kepadatan curah yang lebih tinggi menghasilkan nilai kekuatan penghancur dingin

(CCS) yang lebih tinggi (dari 2350 menjadi 2850 kg/cm³), namun penambahan ZAS hanya mencapai 5,0% berat. Pada penambahan ZAS yang semakin tinggi, nilai CCS kembali mengalami penurunan.

Salah satu metode pengolahan MRB bekas yang umum dilakukan adalah dengan cara pembuangan atau dumping Wang et al., (2023). Namun, pembuangan MRB bekas, jika dilakukan secara tidak efisien, dapat menyebabkan dampak negatif terhadap lingkungan dan pengelolaan sumber daya alam. Oleh karena itu, diperlukan kebutuhan untuk mencari alternatif yang lebih berkelanjutan dalam pengolahan MRB bekas, seperti daur ulang atau penggunaan kembali materialnya. Langkah ini bertujuan untuk meminimalkan dampak lingkungan dan memaksimalkan efisiensi sumber daya, sehingga menciptakan pendekatan yang lebih berkelanjutan dalam siklus hidup batu bata tahan api Magnesia.

Sekaitan dengan hal ini, beton juga merupakan material yang membutuhkan perhatian khusus dalam penggunaan dan pengolahan. Beton memiliki perilaku mekanik yang beragam, termasuk kekuatan tekan yang merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kinerja strukturalnya. Pengujian kekuatan tekan beton adalah metode umum yang digunakan untuk menentukan kemampuan material ini dalam menahan tekanan. Kekuatan tekan beton sangat penting dalam berbagai aplikasi konstruksi, seperti pembangunan gedung, Jembatan, dan khususnya dalam desain beton prategang di mana kinerja struktural bergantung pada kemampuan material untuk menahan tekanan secara keseluruhan. Pengujian kekuatan tekan beton dapat dilakukan dengan beberapa metode yang berbeda, termasuk uji tekan silinder, uji tekan kubus, dan uji tekan balok. Setiap metode pengujian menghasilkan nilai kekuatan tekan yang bervariasi, namun umumnya berkisar antara 20 hingga 50 MPa, tergantung pada campuran beton dan kondisi pembuatannya.

Selain kuat tekan, Salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja strukturalnya adalah kekuatan lentur. Kekuatan lentur beton mengukur kemampuan material ini untuk menahan tekanan secara merata. Pengujian kekuatan lentur beton adalah metode umum yang digunakan untuk menentukan kemampuan ini. Kekuatan lentur pada beton juga memiliki peran vital dalam berbagai aplikasi konstruksi, seperti pembangunan jalan raya, perkerasan lentur dan lain lain di mana kinerja struktural sangat bergantung pada kemampuan material untuk menahan

tekanan secara merata. Pengujian kekuatan lentur beton dapat dilakukan dengan beberapa metode yang berbeda, seperti uji lentur balok atau uji lentur silinder. Setiap metode pengujian menghasilkan nilai kekuatan lentur yang bervariasi, namun umumnya berkisar antara 3 hingga 7 MPa, tergantung pada campuran beton dan kondisi pembuatannya.

Nematzadeh and Baradaran-Nasiri, (2018) meneliti tentang penggunaan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti agregat halus dari persentase 0% sampai 100% dari volume agregat halus yang digunakan setelah terpapar suhu tinggi. Hasilnya diperoleh bahwa peningkatan persentase agregat halus dari limbah batu bata meningkatkan kinerja tekan beton pada suhu yang lebih tinggi. (Khattab et al., (2021) meneliti tentang penggunaan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti agregat kasar dengan persentase 10 sampai 100% penggantian menggunakan dua w/c yaitu 0.59 dan 0.38. Hasilnya diperoleh bahwa penggunaan limbah batu bata sampai 30% penggantian, menghasilkan beton dengan kualitas yang baik. Selain itu, Khattab, Hachemi and Al Ajlouni, (2021) juga meneliti pengaruh penggantian 20% agregat kasar alami dengan limbah batu bata tahan api menggunakan tiga w/c yaitu 0.59, 0.47, dan 0.38. Diperoleh bahwa limbah batu bata tahan api merupakan alternatif potensial untuk menggantikan agregat kasar alami dalam campuran beton. Hchemi et.al, (2022) dalam penelitiannya, memperoleh bahwa penggantian 20% agregat halus dan agregat kasar alami dengan limbah batu bata tahan api menghasilkan sifat fisik dan mekanik beton yang lebih baik dibandingkan dengan penggantian 20% agregat kasar dengan limbah batu bata. Zeghad et al., (2017) memperoleh bahwa limbah batu bata tahan api berpotensi digunakan sebagai bahan semen atau tambahan dalam produksi beton.

Berdasarkan uraian tersebut, penulis memutuskan untuk melakukan penelitian tentang potensi pemanfaatan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti sebagian agregat kasar dalam komposisi beton. Penulis memilih limbah batu bata tahan api tipe magnesia, mengingat minimnya penelitian terkait penggunaan limbah batu bata tahan api tipe magnesia dalam campuran beton. Selain itu, penelitian sebelumnya lebih cenderung memfokuskan pada pemanfaatan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti agregat halus, meskipun ada beberapa penelitian yang mencoba menggunakan limbah batu bata tahan api sebagai agregat

kasar. Namun, variasi persentase penggantian yang digunakan dalam penelitian tersebut masih terbatas. Oleh karena itu, penulis memilih untuk mengeksplorasi pemanfaatan limbah batu bata tahan api sebagai agregat kasar dalam penelitian ini.

Adapun judul yang diangkat oleh penulis adalah **“PERILAKU LENTUR BALOK TERHADAP PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT KASAR”**

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang dapat dirumuskan sesuai dengan latar belakang yang telah dijelaskan, yaitu:

1. Perilaku kuat lentur beton yang menggunakan limbah *refractory brick* atau batu bata tahan api tipe magnesia sebagai substitusi agregat kasar.
2. Pengaruh hubungan beban dan lendutan beton yang mengandung limbah *refractory brick* atau batu bata tahan api tipe magnesia sebagai substitusi agregat kasar.

I.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kuat lentur beton yang menggunakan limbah *refractory brick* atau batu bata tahan api tipe magnesia sebagai substitusi agregat kasar.
2. Menganalisis hubungan beban dan lendutan beton yang mengandung limbah *refractory brick* atau batu bata tahan api tipe magnesia sebagai substitusi agregat kasar.

I.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini yaitu selain untuk menambah ilmu pengetahuan, juga untuk mengurangi salah satu limbah industri berupa *refractory brick* melalui pemanfaatan sebagai substitusi parsial agregat kasar di campuran beton, serta mengurangi penggunaan agregat alami pada campuran beton sehingga akan dihasilkan beton yang ramah lingkungan dan ekonomis.

I.5 Ruang Lingkup

Untuk mencapai maksud dan tujuan dari penulisan tugas akhir ini maka ditetapkan batasan-batasan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Pengujian dilakukan di Laboratorium yang sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI).

2. Semen yang digunakan adalah jenis semen portland komposit (PCC) dan telah memenuhi SNI-2049-2015.
3. Pasir yang digunakan merupakan hasil dari *crushing* batu reject yang berasal dari PT. Vale Indonesia.
4. Agregat kasar yang digunakan memiliki ukuran maksimal 14 mm dan 28 mm, berasal dari batu pecah PT. Vale Indonesia, dan telah memenuhi persyaratan SNI-03-1968-1990.
5. Limbah *refractory bricks* atau batu bata tahan api yang digunakan merupakan limbah batu bata tahan api tipe *magnesia* yang berasal dari PT. Vale Indonesia.
6. Air yang digunakan dalam campuran beton adalah air tawar yang berada di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik sipil, Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa.
7. Mutu beton rencana yang diharapkan yaitu 21 MPa dan 25 MPa, serta pengujian kuat lentur menggunakan sampel berbentuk balok dengan ukuran Panjang 40 cm, lebar 10 cm dan tinggi 10 cm yang diuji pada umur 28 hari.
8. Proses perawatan (*curing*) yang dilakukan adalah *curing* air tawar.

I.6 Sistematika Penulisan

Penulisan tesis dengan judul “**PERILAKU LENTUR BALOK TERHADAP PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT KASAR**”, terbagi menjadi tiga (3) bab dengan sistematika pembahasan sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Dalam bab ini menguraikan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penulisan, manfaat penelitian, ruang lingkup, dan sistematika penulisan

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, penulis meninjau dan menguraikan teori – teori yang berkaitan dengan beton, bahan – bahan penyusun beton, *refractory brick* atau batu bata tahan api, perilaku mekanik dari beton termasuk kuat tekan beton dan kuat

lentur beton, serta penelitian – penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian yang diangkat

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini menguraikan tentang tahapan pelaksanaan penelitian secara lengkap dalam rangka mencapai tujuan penelitian.

BAB IV : HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang pembahasan karakteristik material, perilaku kuat lentur benda uji beton berbentuk balok, serta hubungan beban dan lendutan benda uji beton.

BAB IV : KESIMPULAN

Pada bab ini berisi tentang simpulan dari hasil analisis dan evaluasi dari penelitian yang telah dilakukan, serta saran – saran yang diusulkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Beton

Pada dasarnya, beton terdiri dari agregat, semen hidrolis, air, dan boleh mengandung bahan bersifat semen lainnya dan atau bahan tambahan kimia lainnya SNI 2847 (2019). Beton dapat mengandung sejumlah rongga udara yang terperangkap atau dapat juga rongga udara yang sengaja dimasukkan melalui penambahan bahan tambahan. Bahan tambahan kimia sering digunakan untuk mempercepat, memperlambat, memperbaiki sifat kemudahan pengerjaan (workability), mengurangi air pencampur, menambah kekuatan, atau mengubah sifat-sifat lain dari beton yang dihasilkan.

Dengan bertambahnya waktu, beton akan mengalami penguatan dan mencapai kekuatan desainnya dalam kurun waktu sekitar 28 hari. Kekuatan beton yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh komposisi campuran beton. Nawi E.G, (1998) menjelaskan bahwa beberapa parameter yang menjadi tolak ukur memengaruhi kualitas beton, antara lain:

1. Kualitas dari semen yang digunakan;
2. Rasio semen terhadap air dalam campuran beton;
3. Kebersihan dan kekuatan dari agregat;
4. Interaksi antara agregat dan pasta semen;
5. Pencampuran dari komponen – komponen pembentuk beton yang proporsional;
6. Penempatan yang tepat, penanganan dan kompaksi dari beton segar;
7. Perawatan dilakukan pada suhu tidak kurang dari 50⁰F;
8. Kandungan klorida tidak lebih dari 0.15% pada beton ekspos dan 1% pada beton terlindung.

II.2 Bahan Penyusun Beton

II.2.1 Beton

Semen merupakan bahan pengikat hidrolis, yaitu bahan anorganik yang ditumbuk halus dan ketika bercampur dengan air dengan menggunakan reaksi dan proses hidrasi membentuk pasta yang mengikat dan mengeras, setelah mengeras, tetap mempertahankan kekuatan dan stabilitasnya meskipun di dalam air. Semen

portland adalah bahan konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pekerjaan beton. Berdasarkan SNI 15 2094 (2004), semen *portland* adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak (*clinker*) *portland* terutama yang terdiri dari kalsium silikat ($x\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat ($\text{CaSO}_4\cdot x\text{H}_2\text{O}$) dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Hidrolis berarti sangat senang bereaksi dengan air, senyawa yang bersifat hidrolis akan bereaksi dengan air secara cepat. Semen *portland* bersifat hidrolis karena di dalamnya terkandung kalsium silikat ($x\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) dan kalsium sulfat ($\text{CaSO}_4\cdot x\text{H}_2\text{O}$) yang bersifat hidrolis dan sangat cepat bereaksi dengan air. Reaksi semen dengan air berlangsung secara *irreversible*, artinya hanya dapat terjadi satu kali dan tidak bisa kembali lagi ke kondisi semula 10. SNI 15 2049 (2004).

Semen *portland* dibuat dari serbuk halus mineral kristalin yang komposisi utamanya adalah kalsium dan aluminium silikat. Penambahan air pada mineral ini menghasilkan suatu pasta yang jika mengering akan mempunyai kekuatan seperti batu. Berat jenisnya berkisar antara 3.12 dan 3.16. Berat volume satu sak semen adalah 94 lb/ft^3 . Bahan baku pembentuk semen adalah:

1. Kapur (CaO) – dari batu kapur
2. Silika (SiO_2) – dari lempung
3. Alumina (Al_2O_3) – dari lempung (dengan sedikit presentasi magnesia, MgO , dan terkadang sedikit alkali). Oksida besi terkadang ditambahkan untuk mengontrol komposisinya Nawi (1998).

Semen dibedakan menjadi beberapa jenis, antara lain:

a. Semen Portland

Semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain 10. SNI 15 2049 (2004).

b. Semen Portland Komposit

Bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencam

puran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozzolan, senyawa silikat, batu kapur dengan kadar total bahan anorganik 6% - 35% dari massa semen portland komposit SNI 15 7064 (2004).

c. Semen Portland Putih

Semen hidrolis yang berwarna putih dan dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland putih yang terutama terdiri atas kalsium silikat dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat SNI 15 0129 (2004).

d. Semen Portland Pozzolan

Suatu semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogen antara semen portland dengan pozzolan halus, yang di produksi dengan menggiling klinker semen portland dan pozzolan bersama-sama, atau mencampur secara merata bubuk semen portland dengan bubuk pozzolan, atau gabungan antara menggiling dan mencampur, dimana kadar pozzolan 6 % sampai dengan 40 % massa semen portland pozzolan SNI 15 0302 (2004).

e. Semen Masonry

Semen hidrolis yang digunakan terutama dalam pekerjaan menembok dan memplester konstruksi, yang terdiri dari campuran dari semen portland atau campuran semen hidrolis dengan bahan yang bersifat menambah keplastisan (seperti batu kapur, kapur yang terhidrasi atau kapur hidrolis) bersamaan dengan bahan lain yang digunakan untuk meningkatkan satu atau lebih sifat seperti waktu pengikatan (*setting time*), kemampuan kerja (*workability*), daya simpan air (*water retention*), dan ketahanan (*durability*) SNI 15 3758 (2004).

f. Semen Portland Campur

Suatu bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama dari terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik yang bersifat tidak bereaksi (*inert*) SNI 15 3500 (2004).

Menurut Standar Nasional Indonesia SNI 15 2049 (2004) *Semen Portland/Ordinary Portland Cement (OPC)* dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan penggunaannya, yaitu :

a. Jenis I

Semen portland tipe I merupakan jenis semen yang digunakan dalam penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.

b. Jenis II

Semen portland tipe II merupakan semen yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.

c. Jenis III

Semen portland tipe III merupakan semen yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.

d. Jenis IV

Semen portland tipe IV merupakan semen yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.

e. Jenis V

Semen portland tipe V merupakan semen yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

II.2.2 Agregat

Agregat adalah bahan berbutir seperti pasir, kerikil, batu pecah dan slag tanur (*blast-furnace slag*) yang digunakan dengan media perekat untuk menghasilkan beton atau mortar semen hidrolis SNI 2847 (2019).

Agregat merupakan komponen beton yang paling berperan dalam menentukan besarnya. Pada beton biasanya terdapat sekitar 60% sampai 80% volume agregat. Agregat ini harus bergradasi sedemikian rupa sehingga seluruh massa beton dapat berfungsi sebagai benda yang utuh, homogen dan rapat. Di mana agregat yang berukuran kecil berfungsi sebagai pengisi celah yang ada di antara agregat berukuran besar. Karena agregat merupakan bahan yang terbanyak di dalam beton, maka semakin banyak persen agregat dalam campuran akan semakin murah harga beton, dengan syarat campurannya masih cukup mudah dikerjakan untuk elemen struktur yang memakai beton tersebut Nawi E.G, (1998).

Agregat merupakan bahan penyusun beton yang menempati 70 - 75% dari total volume beton sehingga kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap kualitas beton. Meskipun dulu agregat dianggap sebagai material pasif, berperan sebagai bahan pengisi saja, kini disadari adanya kontribusi positif agregat pada sifat beton, seperti stabilitas volume, ketahanan abrasi dan ketahanan umum (*durability*) diakui.

Bahkan beberapa sifat fisik beton secara langsung tergantung pada sifat agregat seperti kepadatan, panas jenis dan modulus elastisitas. Agregat berdasarkan ukuran butirnya dibedakan menjadi dua yaitu:

(a) Agregat Kasar

Menurut Standar Nasional Indonesia SNI 03 2834 (2000), agregat kasar merupakan kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batu atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm.

Jenis agregat kasar yang umum adalah:

1. Batu pecah alami

Bahan ini didapat dari cadas atau batu pecah alami yang digali. Batu ini dapat berasal dari gunung api, jenis sedimen atau jenis metamorf. Meskipun dapat menghasilkan kekuatan yang tinggi terhadap beton, batu pecah kurang memberikan kemudahan pengerjaan dan pengecoran dibandingkan dengan jenis agregat kasar lainnya.

2. Kerikil alami

Kerikil didapat dari proses alami, yaitu pengikisan tepi maupun dasar sungai oleh air sungai yang mengalir. Kerikil memberikan kekuatan yang lebih rendah daripada batu pecah, tetapi memberikan kemudahan pengerjaan yang lebih tinggi.

3. Agregat kasar buatan

Terutama berupa slag atau shale yang biasa digunakan untuk beton berbobot ringan. Biasanya merupakan hasil dari proses lain seperti dari blast-furnace dan lain-lain.

4. Agregat untuk pelindung nuklir dan berbobot berat

Dengan adanya tuntutan yang spesifik pada zaman atom sekarang ini, juga untuk pelindung dari radiasi nuklir sebagai akibat dari semakin banyaknya pembangkit atom dan stasiun tenaga nuklir, maka perlu ada beton yang dapat melindungi dari sinar x, sinar gamma dan neutron. Pada beton demikian syarat ekonomis maupun syarat kemudahan pengerjaan tidak begitu menentukan. Agregat kasar yang diklasifikasikan di sini misalnya baja pecah, barit, magnetit dan limonit.

Berat volume beton yang menggunakan agregat biasa adalah sekitar 144 lb/ft³. Sedangkan beton dengan agregat berbobot berat mempunyai berat volume sekitar 225 sampai 330 lb/ft³. Sifat-sifat beton penahan radiasi yang berbobot berat ini bergantung pada kerapatan dan kepadatannya, hampir tidak bergantung pada sektor air semennya. Dalam hal demikian, kerapatan yang tinggi merupakan satu-satunya kriteria di samping kerapatan dan kekuatannya Nawi E.G, (1998).

Menurut ASTM C 33-03 (2003) gradasi agregat melalui persentase berat yang melalui masing-masing tabel ayakan yaitu seperti pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Syarat Gradasi Agregat Sesuai ASTM C 33-03 (2003)

No. Ayakan	% Berat melalui ayakan				
	Agregat Kasar		Agregat Halus		
	Batas Bawah	Batas Atas	Batas Bawah	Batas Atas	
1 in	25	95	100	-	-
¾ in	19	-	-	-	-
½ in	12.5	25	60	-	-
3/8 in	10	-	-	100	100
No. 4	15	0	10	95	100
No. 8	2.5	0	5	80	100
No. 16	1.2	-	-	50	85
No. 30	0.6	-	-	25	60
No. 50	0.3	-	-	10	30
No. 100	0.15	-	-	2	10
Dasar		-	-	-	-

(b) Agregat Halus

Menurut Standar Nasional Indonesia SNI 03 2834 (2000)(SNI 03-2834-, 2000)(SNI 03-2834-, 2000)(SNI 03-2834-, 2000)(SNI 03-2834-, 2000) , agregat halus merupakan pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami dari batu atau pasir yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5.0 mm.

Agregat halus merupakan pengisi yang berupa pasir. Ukurannya bervariasi antara ukuran No. 4 dan No. 100 saringan standar Amerika. Agregat halus yang baik harus bebas bahan organik lempung, partikel yang lebih kecil dari saringan No. 100 atau bahan-bahan lain yang dapat merusak campuran beton. Variasi ukuran

dalam suatu campuran harus mempunyai gradasi yang baik, yang sesuai dengan standar analisis saringan dari ASTM (*American Society of Testing and Materials*). Untuk beton penahan radiasi, serbuk baja dan serbuk besi pecah digunakan sebagai agregat halus Nawi E.G, (1998). Syarat-syarat agregat halus adalah :

- a. Agregat halus harus terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras. Butir-butir agregat halus harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- b. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering). Yang diartikan dengan lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0.063 mm. Apabila kadar lumpur melampaui 5% maka agregat halus harus dicuci.
- c. Agregat halus tidak boleh mengandung bahan-bahan organis terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrams-Harder (dengan larutan NaOH). Agregat halus yang tidak memenuhi percobaan warna ini dapat juga dipakai, asal kekuatan tekan adukan agregat tersebut pada umur 7 dan 28 hari tidak kurang dari 95% dari kekuatan aduk agregat yang sama tetapi dicuci dalam larutan 3% NaOH yang kemudian dicuci hingga bersih dengan air, pada umur yang sama.
- d. Agregat halus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan harus memenuhi syarat-syarat berikut :
 - Sisa di atas ayakan 4 mm, harus minimum 2% berat.
 - Sisa di atas ayakan 1 mm, harus minimum 10% berat.
 - Sisa di atas ayakan 0.25 mm, harus berkisar antara 80% dan 95% berat.

Pasir dapat digolongkan menjadi 3 macam yaitu :

- a. Pasir galian, dapat diperoleh diperoleh langsung dari permukaan tanah atau dengan cara menggali terlebih dahulu. Pasir ini biasanya tajam, bersudut berpori dan bebas dari kandungan garam.
- b. Pasir sungai diperoleh langsung dari dasar sungai, yang pada umumnya berbutir halus bulat-bulat akibat proses gesekan, sehingga daya lekat antar butir-butir berkurang. Pasir ini paling baik dipakai untuk memplester tembok.

- c. Pasir laut diambil dari pantai, butir-butirnya halus dan bulat akibat gesekan. Banyak mengandung garam yang dapat menyerap kandungan air dari udara. Pasir laut tidak baik digunakan sebagai bahan bangunan.

Agregat halus memiliki zona-zona berdasarkan ukuran lolos saringannya. Menurut SNI 03 1968 (1990), gradasi pasir dibagi menjadi empat kelompok yaitu pasir kasar, pasir agak kasar, pasir agak halus dan pasir halus seperti tersaji pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Gradasi Agregat Halus

Lubang. Ayakan ____ (mm)	Persen Berat Butir yang Lewat Ayakan (%)			
	Kasar	Agak kasar	Agak halus	Halus
10	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	90-100	95-100
2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

II.2.3 Refractory Brick (RB)

Batu bata tahan api atau *refractory brick* merupakan bahan padat yang dapat menahan suhu tinggi dan mempertahankan fungsi mekanisnya untuk jangka waktu tertentu dalam segala keadaan, bahkan jika bersentuhan dengan cairan maupun gas korosif. Batu bata tahan api sangat diperlukan untuk semua kegiatan yang memerlukan ketahanan terhadap suhu tinggi, misalnya produksi logam, semen, kaca, serta keramik Horckmans et al., (2019). Batu bata tahan api termasuk dalam bahan keramik yang memiliki kemampuan untuk mempertahankan bentuk dan kekuatannya pada berbagai kondisi termasuk pada kondisi bersuhu tinggi, cairan

bersifat korosif termasuk zat – zat kimia lainnya, gas – gas panas, tahan terhadap abrasi, serta tegangan mekanik akibat panas Kavas et al., (2006).

Terdapat berbagai macam *refraktori*, yang dirancang untuk memenuhi persyaratan suhu dan proses dari setiap pengaplikasian. *Refraktori* diaplikasikan dalam berbagai cara, yang paling umum adalah berdasarkan metode pemasangan (berbentuk, suhu pembakaran 1500⁰C dan tidak berbentuk), jenis ikatan, dan komposisi kimia (asam, basa, atau netral). Klasifikasi menjadi asam, basa, atau netral berdasarkan dari interaksi bahan baku utama dengan air. Refraktori asam seperti bahan alumina-silikat, silika, dan zircon biasanya digunakan untuk suhu operasi yang lebih rendah daripada *refraktori* lain dan cenderung lebih ekonomis untuk diproduksi. *Refraktori* netral seperti alumina dan kromia, digunakan secara luas oleh industri logam karena suhu lelehnya yang tinggi, harga sedang, dan memiliki kemampuan untuk digunakan baik pada lingkungan basa maupun lingkungan asam. Selain itu refraktori jenis alumina merupakan bahan netral yang ketersediaannya lebih banyak apabila dibandingkan dengan *refraktori* kromia, karena *refraktori* kromia memberikan dampak buruk ke lingkungan Fang et al., (1999). *Refraktori* bauksit (kandungan alumina tinggi) pada umumnya digunakan pada industri baja misalnya pada tungku busur listrik dan dalam industri semen dan kapur misalnya lapisan tanur putar Horckmans et al., (2019).

II.3 Sifat Mekanik Beton

II.3.1 Kuat Tekan Beton

Menurut SNI 1974 (2011), kuat tekan beton ($f'c$) adalah besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Nilai kecepatan pembebanan yang digunakan pada penelitian ini sebesar 1.3 mm/menit.

Nilai kuat tekan beton dapat dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima oleh benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintang rata yang ditentukan.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dimana,

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa atau N/mm²).

P = Gaya tekan aksial (N).

A = Luas penampang melintang benda uji (mm²).

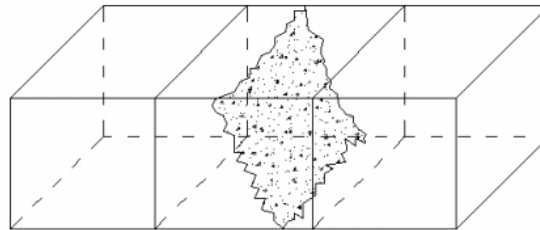
II.3.2 Kuat Lentur Beton

Menurut SNI 4431 (2011), kuat lentur beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji. Gaya tersebut diberikan kepada balok beton sampai benda uji menjadi patah. Hasil pengujian ini dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya per satuan luas.

Jarak titik belah balok beton sampai ujung balok beton sangat penting untuk menentukan rumus yang dipakai, yaitu :

1. Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada di daerah pusat (pada 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah) dapat dilihat pada **Gambar 1**, maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan:

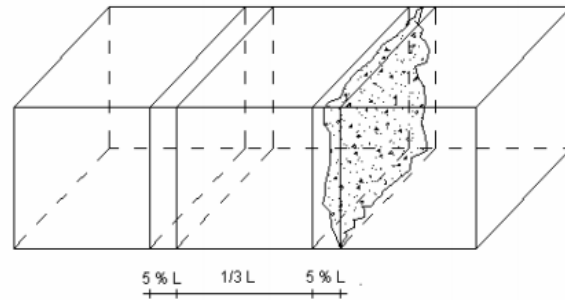
$$\sigma_1 = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$



Gambar 1 Patah pada bentang 1/3 bentang tengah

2. Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada diluar pusat (diluar daerah 1/3 jarak titik perletakan) di bagian tarik beton, dan jarak antara titik dan titik patah kurang dari 5% dari panjang titik perletakan (**Gambar 2**) maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan:

$$\sigma_1 = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (3)$$



Gambar 2 Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang

Dimana,

σ_l = kuat lentur (N/mm^2)

P = beban maksimum total (N)

L = Panjang bentang (mm)

b = Lebar benda uji (mm)

d = Tebal benda uji (mm)

a = Jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan terdekat diukur pada bagian tarik spesimen.

II.4 Pengujian UPV Beton

Pengujian UPV dilakukan sesuai dengan SNI ASTM C597 (2012) dengan cara merambatkan gelombang longitudinal yang dihasilkan oleh transduser elektroakustik yang bersentuhan dengan salah satu permukaan beton yang diuji. Perambatan gelombang diterima dan diubah menjadi energi listrik oleh transduser kedua yang terletak pada jarak (L) dari transduser pemancar setelah merambat melalui beton. T adalah pengukuran elektronik waktu perjalanan. Perbandingan L dengan T digunakan untuk mendapatkan kecepatan rambat gelombang (V). Menurut persamaan 2, cepat rambat gelombang longitudinal pada suatu massa beton berhubungan dengan parameter elastisitas dan densitas.

$$V = \frac{L}{T} \quad (4)$$

Keterangan :

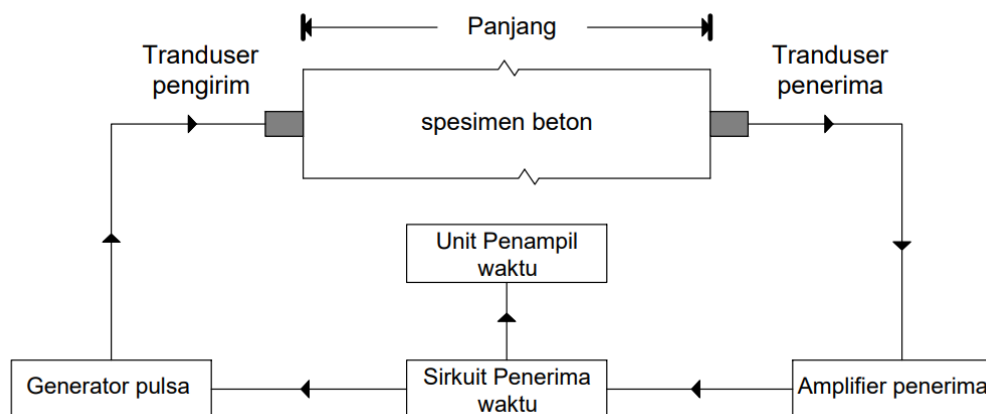
V = *Ultrasonic Pulse Velocity* (km/s)

L = Jarak antara pusat permukaan transduser (m)

T = Waktu tempuh (s)

Kecepatan rambat gelombang pada beton diukur untuk menganalisis atau mengidentifikasi keseragaman dan mutu relatif beton, mendeteksi adanya rongga dan patahan, serta memperkirakan keberhasilan perbaikan retak. Tes ini juga dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik beton dan untuk menilai tingkat kerusakan atau retakan pada beton saat memeriksa suatu konstruksi. Jika digunakan untuk memantau perubahan kondisi dari waktu ke waktu, lokasi pengujian pada struktur harus ditandai sehingga pengujian dapat diulangi di tempat yang sama.

Tingkat kejenuhan beton mempengaruhi kecepatan rambat gelombang, yang harus diatasi saat menganalisis temuan pengujian. Selain itu, kecepatan rambat gelombang pada beton jenuh air tidak terlalu rentan terhadap variasi kualitas beton relatif. Kecepatan rambat gelombang pada beton jenuh air bisa 5% lebih cepat dibandingkan pada beton kering. Kecepatan rambat gelombang tidak dipengaruhi oleh ukuran benda uji atau pantulan gelombang dari sisi benda uji. Keakuratan pengukuran ditentukan oleh kemampuan operator dalam menghitung jarak yang tepat antara transduser pemancar dan penerima, serta kemampuan peralatan untuk mengukur secara tepat waktu tempuh kecepatan rambat gelombang.



Gambar 3 Skematik pengujian Ultrasonik Pulse Velocity (UPV)

II.5 Porositas Beton

Volume rongga (pori-pori) pada beton dibandingkan dengan volume total beton pada pengujian porositas beton. Pada beton, porositas sangat berhubungan dengan permeabilitas. Kuat tekan beton dipengaruhi oleh kepadatannya yang tinggi. Semakin besar nilai porositas beton maka semakin rendah pula kuat tekan beton tersebut. Pengujian porositas dilakukan untuk menemukan pendekatan sederhana

dan efektif untuk mengukur kepadatan dan porositas sampel secara keseluruhan. Pengujian porositas dilakukan sesuai dengan ASTM C 642-97 (1997), yaitu prosedur yang digunakan untuk menentukan kepadatan dan kandungan rongga pada benda uji.

$$\rho = \frac{(W_{ssd} - W_{ad})}{(W_{ssd} - W_w)} \times 100\% \quad (5)$$

Dimana :

- ρ = Porositas beton (%)
- W_{ssd} = Berat kering permukaan jenuh (gram)
- W_{ad} = Berat Kering Oven (gram)
- W_w = Berat Sampel dalam air (gram)

II.6 Densitas

Pengujian berat jenis beton sangat penting dalam menentukan kualitas dan kekuatan beton yang digunakan dalam konstruksi. Densitas beton mempengaruhi berbagai faktor seperti kekuatan struktur, ketahanan terhadap beban, dan daya tahan terhadap cuaca dan lingkungan. Dalam pengujian berat jenis beton, salah satu metode yang sering digunakan adalah pengujian dengan sampel balok beton. Metode ini melibatkan pembuatan dan pengujian sampel beton dalam bentuk balok dengan ukuran dan proporsi tertentu. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengukur berat jenis beton yang dihasilkan, yaitu berapa kilogram per meter kubik (kg/m^3). Berat jenis beton dapat memberikan informasi tentang jumlah bahan agregat yang digunakan dalam campuran beton, kepadatan dan porositas beton, serta kemampuan beton untuk menahan beban. Pengujian densitas dilakukan sesuai dengan ASTM C138/C138M-17a (2017) yaitu prosedur yang digunakan untuk menentukan berat jenis pada benda beton.

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (7)$$

Dimana :

- D = Densitas beton (kg/m^3)
- M_c = Berat wadah ukur yang diisi beton (kg)
- M_m = Berat wadah ukur (kg)
- V_m = Volume wadah ukur (m^3)

II.7 Lendutan / Defleksi

Defleksi atau perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertikal yang diberikan pada balok atau batang. Deformasi pada balok secara sangat mudah dapat dijelaskan berdasarkan defleksi balok dari posisinya sebelum mengalami pembebanan. Defleksi diukur dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah terjadi deformasi. Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi yaitu :

1. Kekakuan Batang (EI) Semakin kaku suatu batang maka lendutan batang yang akan terjadi pada batang akan semakin kecil. Kekakuan batang ini meliputi tinggi batang/balok yang diuji. Semakin tinggi keadaan balok atau batang maka akan meningkatkan kekakuan pada batang tersebut, atau biasa disebut dengan Momen Inersia.
2. Keadaan Gaya (P) Besar-kecilnya gaya yang diberikan pada batang berbanding lurus dengan besarnya defleksi yang terjadi. Dengan kata lain semakin besar beban yang dialami batang maka defleksi yang terjadipun semakin besar dan begitu sebaliknya.
3. Jenis tumpuan yang diberikan Jumlah reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Jika karena itu besarnya defleksi pada penggunaan tumpuan yang berbeda-beda tidaklah sama. Semakin banyak reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban maka defleksi yang terjadi pada tumpuan rol lebih besar dari tumpuan pin (pasak) dan defleksi yang terjadi pada tumpuan pin lebih besar dari tumpuan jepit.
4. Jenis beban yang terjadi pada batang Beban terdistribusi merata dengan beban titik, keduanya memiliki kurva defleksi berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata slope yang terjadi pada bagian batang yang paling dekat lebih besar dari slope titik. Ini karena sepanjang batang mengalami beban sedangkan pada beban titik hanya terjadi pada beban titik tertentu saja.
5. Panjang batang (L) Panjang batang ini akan berpengaruh terhadap besar kecilnya lendutan pada suatu batang
6. Dimensi penampang batang (I) Dimensi yang dimaksud adalah dimensi yang akan mengalami defleksi itu sendiri akibat beban yang akan diterimanya.

II.8 Penelitian Terdahulu

Ghosh and Samanta, (2023) Pada bagian ini akan dijabarkan hasil-hasil penelitian terdahulu yang dapat dijadikan acuan dalam penyelesaian topik penelitian ini. Penelitian terdahulu telah dipilih sesuai dengan permasalahan dalam penelitian, sehingga diharapkan mampu menjelaskan maupun memberikan referensi bagi penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Berikut dijelaskan beberapa penelitian terdahulu yang telah dipilih.

melakukan studi eksperimental terkait pemanfaatan limbah batu bata tahan api (RRB) sebagai agregat halus (FA). Delapan campuran beton dengan persentasi penggunaan FA dari RBB sebesar 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, dan 100% digunakan. Pengujian kuat tekan (CS) dengan metode destruktif dan non destruktif dari tarik belah kekuatan (STS) dilakukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RBB meningkatkan perilaku tekan pada semua benda uji beton dimana penggantian 10% dan 20% memberikan hasil yang optimal. Sedangkan untuk pengujian STS diperoleh penggantian 10 – 30% memberikan kinerja yang lebih baik dari benda uji beton lainnya dengan penggantian 10% memberikan hasil yang optimal. Berdasarkan keseluruhan pengujian, diperoleh bahwa penggunaan hingga 30% agregat limbah batu bata tahan api sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton dianggap layak.

Khattab, Hachemi and Al Ajlouni, (2021) melakukan eksperimen untuk mengevaluasi sifat fisik dan mekanik beton yang menggunakan dua tipe batu bata tahan api (RBA) yaitu RBA-1 didapatkan dari penghancuran batu bata tahan api baru yang akan digunakan untuk pembuatan perapian, RBA-2 merupakan limbah batu bata tahan api yang digunakan dalam tungku dari pabrik semen, kedua tipe RBA ini berukuran 5/20 mm dan digunakan sebagai pengganti agregat kasar alami (NCA) dalam campuran beton. Penelitian ini menggunakan tingkat penggantian sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 70%, 100% berdasarkan volume agregat limbah batu bata tahan api. Setiap jenis persen RBA menggunakan rasio air/semen 0.59 dan 0.38. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah kuat tekan, *ultrasonic pulse velocity*, densitas, dan porositas air, yang kemudian akan dibandingkan dengan perolehan nilai dari beton konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RBA-2 memiliki kinerja yang lebih baik daripada RBA-1, dan

secara umum dapat diperoleh bahwa beton dapat diproduksi menggunakan 20% RBA untuk mencapai beton dengan kualitas yang baik.

Nematzadeh and Baradaran-Nasiri, (2018) meneliti tentang perilaku tegangan-regangan tekan beton yang mengandung agregat halus dari limbah batu bata tahan api (RRBC) tipe alumina bersama dengan semen aluminat dan semen portland biasa setelah terpapar suhu tinggi. Penelitian ini menggunakan RRBC dengan tingkat penggantian berdasarkan volume sebesar 0, 25, 50, 75, dan 100%, yang terbagi atas dua kelompok yaitu satu mengandung semen Portland biasa dan yang kedua mengandung semen kalsium aluminat, dengan suhu paparan 110, 200, 400, 600, 800, dan 1000⁰C. Parameter yang diperiksa dalam penelitian ini adalah kuat tekan, modulus elatisitas, tegangan regangan puncak, toughness, dan membandingkan kurva tegangan regangan setelah terpapar suhu tinggi dengan kode internasional. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terjadi degradasi secara signifikan pada sebagian besar sifat mekanik beton yang mengandung semen biasa pada suhu 400⁰C dan untuk beton yang mengandung semen aluminat pada suhu 110⁰C. Selain itu, peningkatan penggunaan limbah batu bata tahan api sebagai substitusi agregat halus turut meningkatkan perilaku tekan beton pada suhu yang lebih tinggi.

Zeghad et al., (2017) melakukan penelitian eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan limbah batu bata tahan api (RWB) sebagai bahan pelengkap pada semen dengan penggantian total silica fume, untuk menghasilkan beton bertulang berbasis serat kinerja tinggi (HPFRC). Penelitian ini menggunakan tiga jenis limbah batu bata tahan api (batu bata yang berbahan dasar utama dari alumina (BRAL), magnesia (BRMg), dan silika-zirkonium (BRZr)) yang ditumbuk halus, dosis dijaga tetap konstan dan serupa dengan dosis asap silika yang digunakan pada beton control. Selain itu, semua komponen seperti rasio air/pengikat dijaga tetap konstan begitupun superplastisizer. Penelitian ini menguji karakteristik dari pengujian beton segar dan keras. Hasil pengujian menunjukkan bahwa limbah batu bata tahan api berpotensi untuk digunakan sebagai bahan semen atau tambahan untuk pembuatan campuran beton.

Debieb and Kenai, (2008) meneliti tentang kemungkinan penggunaan batu bata pecah sebagai agregat kasar dan halus untuk pembuatan beton. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan agregat alami (kasar, halus ataupun keduanya)

yang beratnya disubstitusi dengan batu bata pecah yaitu 0, 25, 50, 75, atau 100%. Kuat tekan dan kuat lentur pada umur 3, 7, 28 dan 90 hari dievaluasi dan dibandingkan dengan beton yang terbuat dari agregat alami. Penyerapan air Porositas, penyusutan, dan permeabilitas juga diselidiki. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembuatan beton menggunakan batu bata pecah baik sebagai agregat kasar maupun agregat halus mungkin untuk dilakukan, karena karakteristik beton menggunakan variasi batu bata pecah sebagai agregat kasar, maupun halus mirip dengan beton yang terbuat dari agregat alami, dengan ketentuan persentase penggunaan agregat batu bata pecah dibatasi masing – masing 25% untuk agregat kasar, dan 50% untuk agregat halus.