

TESIS

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

*Flexural Behavior of the Beam Against the Use of Alumina Type
Refractory Brick Waste as A Substitute for Coarse Aggregate*

**KOMANG SAKA SUWINDU
D012221036**



**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 ALUMINA SEBAGAI PENGGANTI
AGREGAT KASAR**

Tesis

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

Disusun dan diajukan oleh

**KOMANG SAKA SUWINDU
D012221036**

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 : Komang Saka Suwindu
Nomor mahasiswa : D012221036
Program studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Perilaku Lentur Balok Terhadap Penggunaan Limbah Batu Bata Tahan Api Tipe Alumina 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 diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah diproses di *International Journal of Pavement Research and Technology* dengan status *under review (revise)* sebagai artikel dengan judul (“*Flexural Strength of Beam Specimens Using Alumina Type Refractory Brick Waste as Coarse Aggregate*”)

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

Gowa, Juni 2024

Yang menyatakan,



10000
Rp
METER
TEMP
02ALX18840816

KOMANG SAKA SUWINDU

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan yang Maha Esa lagi Maha Penyayang karena atas limpahan berkat dan rahmat-Nya, sehingga 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 ALUMINA SEBAGAI PENGANTI 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. Eng. Ir. Rudy Djamaluddin, ST., M. Eng, Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawati, ST., MT., dan 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* (Andre, Deti, Haerul, Hasniar, Huzair, Jenrisari, Kak Azwar, Kak Erwin, Kak Gery, Kak Iin, Progustin, Rikhwanul, Risal, dan Ummurchair)** 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 istimewa penulis persembahkan kepada:

1. Orangtuaku yang tercinta dan sangat kusayangi, dengan penghargaan tertinggi saya sebutkan dengan hormat nama kedua orang tua saya, yaitu **Bapak (I Made Widastra)** dan **Ibu (Nyoman Sulasmi)**. Terima kasih banyak atas doa, kasih sayang, nasehat, dan segala dukungan yang telah diberikan kepada penulis sampai saat ini dan nanti.
2. Ketiga saudaraku tersayang yaitu **Luh Ika Sulwiani, Kadek Adi Suwiguna, dan Tutut Suwicatur Rischa**. Terima kasih telah menjadi orang-orang yang turut menguatkan penulis dalam menjalani kehidupan, semangat, doa, dan dukungan lainnya yang turut membantu dalam penyelesaian tesis ini.
3. **Erwin Hafid**, partner yang berperan penting dalam proses penyusunan tesis dan penulisan jurnal.
4. Sahabatku **Agum Trianto Gunawan**, yang sangat membantu penulis dalam proses pengerjaan tesis dan sebagai pendengar yang baik untuk semua keluhan-keluhan penulis.
5. Sahabatku nan jauh di sana **James Alfrian, Komang Sujana, Pardi Palullungan, Reynaldi Chrisanto Pratama, Supernades E.S., Wayan Yudawijaya**, dan **Yusrianto** yang tak ada hentinya memberi dukungan kepada penulis.
6. Last but not least, for me myself **Komang Saka Suwindu**. Thank you for being a good person to anyone, thanks for surviving this far. Let's move on to more challenging adventures. A warm hug for myself.

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, Juni 2024

Penulis

Komang Saka Suwindu

LEMBAR PENGESAHAN**TESIS****PERILAKU LENTUR BALOK TERHADAP
PENGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API
TIPE ALUMINA SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT
KASAR****KOMANG SAKA SUWINDU
D012221036**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 29 Mei 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan



Menyetujui,

Pembimbing Utama



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

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. 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

Komang Saka Suwindu. *Perilaku Lentur Balok Terhadap Penggunaan Limbah Bata Tahan Api Jenis Alumina Sebagai Pengganti Agregat Kasar* (dibimbing oleh **M. Akbar Caronge** dan **M. Wihardi Tjaronge**).

Penelitian ini menyajikan hasil uji eksperimen pemanfaatan limbah bata tahan api (RBW) sebagai pengganti agregat kasar konvensional dalam pembuatan beton ramah lingkungan. Dua nilai faktor air semen (fas) yang berbeda yaitu 0,52 dan 0,49 digunakan untuk pembuatan campuran beton, dimana pada setiap fas beton biasa dimodifikasi melalui penggunaan RBW dengan persentase 0%, 15%, 30%, dan 50% dari total volume agregat kasar menggantikan agregat kasar konvensional. Uji slump dan kepadatan beton diterapkan pada beton segar. Parameter berikut diuji secara eksperimental pada beton mengeras berumur 28 hari setelah pengecoran: kuat tekan, kuat lentur, porositas, *ultrasonic pulse velocity* (UPV) dan hubungan antara beban lentur terhadap lendutan. Hasil pengujian percobaan menunjukkan bahwa beton pengerasan yang dimodifikasi dengan RBW menghasilkan porositas yang lebih tinggi sehingga memiliki kuat tekan, kuat lentur, dan nilai UPV yang lebih rendah dibandingkan dengan beton biasa. Secara keseluruhan beton RBW mempunyai sifat getas yang sama dengan beton biasa. Selanjutnya untuk benda uji dengan fas 0,52 dan w/c 0,49, seluruh beton yang dimodifikasi dengan RBW memperoleh beban puncak yang lebih rendah dibandingkan benda uji beton biasa. Selain itu, penggunaan RBW tidak memberikan pengaruh spesifik terhadap keretakan beton, dan analisis mikrostruktur ITZ menunjukkan material RBW dapat melekat dengan baik pada matriks semen. Berdasarkan analisis hasil pengujian pada seluruh fas, 15%RBW menunjukkan perolehan yang lebih baik dibandingkan variasi 30%RBW, dan 50%RBW. Dapat disimpulkan, penggunaan 15%RBW sebagai pengganti agregat kasar merupakan alternatif potensial yang layak untuk memproduksi beton berkelanjutan.

Kata kunci: Limbah bata tahan api (RBW), kuat tekan, kuat lentur, densitas, porositas, hubungan beban-lendutan, beton berkelanjutan.

ABSTRACT

Komang Saka Suwindu. *Flexural Behavior of the Beam Against the Use of Alumina Type Refractory Brick Waste as A Substitute for Coarse Aggregate* (supervised by **M. Akbar Caronge** and **M. Wihardi Tjaronge**)

This research presents the results of experimental tests on the use of refractory brick waste (RBW) as a substitute for conventional coarse aggregate in making environmentally friendly concrete. Two different w/c ratios, namely 0.52 and 0.49, are used to prepare the concrete mixture, where at each w/c, ordinary concrete is modified through the use of RBW with percentages of 0%, 15%, 30%, and 50% of the total volume of coarse aggregate replaces conventional coarse aggregate. Concrete slump and density tests are applied to fresh concrete. The following parameters were tested experimentally on hardened concrete aged 28 days after casting: compressive strength, flexural strength, porosity, ultrasonic pulse velocity (UPV) and the relationship between flexural load and deflection. Experimental test result show that hardened concrete modified with RBW produces higher porosity and thus has lower compressive strength, flexural strength and UPV values compared to ordinary concrete. In addition, the use of RBW does not have a specific effect on concrete fracture, and ITZ microstructure analysis shows that RBW material can adhere well to the cement matrix. Based on the analysis of test results on all facilities, 15%RBW shows better results than variations of 30%RBW and 50%RBW. It can be concluded that the use of 15% RBW as a substitute for coarse aggregate is a potentially viable alternative for producing sustainable concrete.

Keywords: Refractory brick waste (RBW), compressive strength, flexural strength, density, porosity, load-deflection relationship, sustainable concrete.

DAFTAR ISI

PENGAJUAN TESIS	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PENGESAHAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACK	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2. 1 Beton	6
2. 2 Bahan Penyusun Beton	6
2.2.1 Semen portland komposit (PCC)	6
2.2.2 Agregat kasar.....	6
2.2.3 Agregat halus (Pasir).....	7
2.2.4 Air	7
2.2.5 <i>Refractory brick</i> (RB).....	8
2. 3 Sifat Mekanik Beton	9
2.3.1 Kuat tekan beton.....	9
2.3.2 Kuat lentur beton.....	9
2. 4 Densitas	11
2. 5 Pengujian UPV Beton	11
2. 6 Porositas Beton	13
2. 7 Lendutan/Defleksi.....	13
2. 8 Penelitian Terdahulu	14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1 Tahapan Penelitian.....	19
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	21
3.3 Jenis dan Sumber Penelitian	21
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	21
3.4.1 Alat.....	21
3.4.2 Bahan.....	22
3.5 Pemeriksaan Karakteristik Material	23
3.6 Rancangan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>)	24
3.7 Pembuatan Benda Uji.....	24
3.8 Pemeriksaan Uji Slump Beton	26
3.9 Metode Perawatan.....	27

3.10 Pengujian Benda Uji	28
3.10.1 Uji Kuat Tekan Silinder.....	28
3.10.2 Uji Kuat Lentur.....	29
3.10.3 Uji <i>ultrasonic pulse velocity</i> (UPV)	29
3.10.4 Pengujian Densitas	30
3.10.5 Pengujian Porositas Beton.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1 Karakteristik Material	32
4.2 Slump Beton.....	33
4.3 Densitas Beton	35
4.4 Kuat Tekan Beton	36
4.5 Kuat Lentur Beton.....	38
4.6 Hubungan Kuat Lentur terhadap Kuat Tekan.....	40
4.7 <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV) Beton	42
4.8 Porositas Beton	44
4.9 Hubungan Beban terhadap Lendutan.....	45
4.10Beban Puncak.....	49
4.11Lendutan Puncak.....	50
4.12Patahan	51
4.13Distribusi Agregat	53
4.14Analisis Mikrostruktur ITZ.....	55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
5.1 Kesimpulan	58
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN.....	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Patah pada bentang 1/3 bentang tengah.....	10
Gambar 2 Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang	10
Gambar 3. Skematik pengujian Ultrasonik Pulse Velocity (UPV)	12
Gambar 4 Diagram alir penelitian	20
Gambar 5 Material campuran beton	23
Gambar 6 Benda uji silinder 10×20 cm.....	25
Gambar 7 Benda uji balok 40×10×10 cm.....	26
Gambar 8 Proses pembuatan benda uji.....	26
Gambar 9 Pemeriksaan uji slump beton	27
Gambar 10 Proses <i>curing</i> dalam bak perendam.....	27
Gambar 11 <i>Universal testing machine</i>	28
Gambar 12 Data logger dan satu set komputer.....	28
Gambar 13 Pengujian kuat tekan beton	29
Gambar 14 Pengujian kuat lentur beton	29
Gambar 15 Pengujian UPV	30
Gambar 16 Pengujian densitas	30
Gambar 17 Pengujian porositas.....	31
Gambar 18 Gradasi ukuran butiran agregat.....	33
Gambar 19 Nilai slump beton untuk persentase penggunaan RBW yang berbeda	34
Gambar 20 Densitas beton untuk persentase penggunaan RBW yang berbeda ..	35
Gambar 21 Kuat tekan beton untuk persentase penggunaan RBW yang berbeda	37
Gambar 22 Kuat lentur beton untuk persentase penggunaan RBW yang berbeda	39
Gambar 23 Grafik hubungan kuat lentur terhadap kuat tekan.....	41
Gambar 24 Grafik hasil pengujian UPV untuk persentase penggunaan RBW yang berbeda	43
Gambar 25 Grafik hasil pengujian porositas beton untuk persentase penggunaan RBW yang berbeda	45
Gambar 26 Grafik gabungan hubungan beban dan lendutan dengan presentase penggunaan RBW yang berbeda untuk fas 0,52	46
Gambar 27 Grafik gabungan hubungan beban dan lendutan rata-rata dengan presentase penggunaan RBW yang berbeda untuk fas 0,52.....	47
Gambar 28 Grafik gabungan hubungan beban dan lendutan dengan presentase penggunaan RBW yang berbeda untuk fas 0,49	48
Gambar 29 Grafik gabungan hubungan beban dan lendutan rata-rata dengan presentase penggunaan RBW yang berbeda untuk fas 0,49.....	48
Gambar 30 Grafik beban puncak dengan presentase penggunaan RBW yang berbeda	49
Gambar 31 Grafik lendutan puncak dengan presentase penggunaan RBW yang berbeda	51
Gambar 32 Hasil pengujian kuat lentur dengan fas 0,52.....	52
Gambar 33 Hasil pengujian kuat lentur dengan fas 0,49.....	53

Gambar 34 Distribusi agregat pada beton dengan fas 0,52	54
Gambar 35 Distribusi agregat pada beton dengan fas 0,49	55
Gambar 36 Hasil pengujian SEM beton kontrol (OC)	56
Gambar 37 Hasil pengujian SEM beton 15%RBW.....	57

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Standar rujukan pemeriksaan karakteristik agregat.....	23
Tabel 2 Rancangan campuran beton (<i>mix design</i>).....	24
Tabel 3 Identifikasi Pembuatan Benda Uji.....	25
Tabel 4 Karakteristik fisik agregat kasar batu pecah.....	32
Tabel 5 Karakteristik fisik agregat kasar limbah batu bata tahan api (RBW) tipe alumina	32
Tabel 6 Karakteristik fisik agregat halus.....	32
Tabel 7 Hasil pengujian densitas beton.....	35
Tabel 8 Hasil pengujian kuat tekan beton	36
Tabel 9 Hasil pengujian kuat lentur beton.....	39
Tabel 10 Nilai konstanta untuk setiap variasi beton.....	42
Tabel 11 Klasifikasi kualitas beton berdasarkan kecepatan gelombang	42
Tabel 12 Hasil pengujian UPV beton.....	43
Tabel 13 Hasil pengujian porositas beton	45

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Singkatan/symbol	Arti dan keterangan
RB	= batu bata tahan api
RBW	= limbah batu bata tahan api atau <i>refractory brick</i>
fas	= factor air semen
PCC	= <i>portland composite cement</i>
$f'c$	= kuat tekan beton benda uji silinder (MPa atau N/mm ²)
P	= gaya tekan aksial dari mesin tekan (N)
A	= luas penampang melintang benda uji (mm ²)
R	= 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.
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)
V	= <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (km/s)
L	= jarak antara pusat permukaan transduser (m)
T	= waktu tempuh (s)
ρ	= porositas beton (%)
Wssd	= berat kering permukaan jenuh (gram)
Wad	= berat Kering Oven (gram)
Ww	= berat Sampel dalam air (gram)
UTM	= <i>universal testing machine</i>
SNI	= standar nasional indonesia
ASTM	= <i>american society for testing and materials</i>
OC	= beton biasa

SEM = *scanning electron microscopy*
ITZ = *interfacial transition zone*
C – S – H = kalsium silikat hidrat

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton adalah material komposit yang memiliki komposisi agregat dengan persentase sekitar 60% sampai dengan 75% dari total volume beton (Cachim, 2009). Tingginya persentase agregat pada komposisi campuran beton menunjukkan bahwa kebutuhan agregat alami juga tinggi, yang apabila dieksploitasi secara terus-menerus, maka akan terjadi kelangkaan yang akan berdampak terhadap kerusakan lingkungan. Indonesia merupakan negara penghasil nikel terbesar pertama di dunia. Dengan cadangan sumber daya alam berupa nikel sebesar 21 juta MT. Saat ini jumlah dinding tungku pembakaran nikel yang dihasilkan mencapai sekitar 4500 ton atau sebesar 150 m³ yang akan diganti setiap 4 tahun sekali, dimana dinding tungku pembakaran tersebut dikategorikan sebagai limbah. Sehingga pembuangan limbah batu bata tahan api (*refractory brick*) akan mempengaruhi lingkungan sekitar pertambangan.

Tingginya konsumsi nikel di Indonesia menyebabkan kapasitas limbah *refractory brick* (RB) yang dihasilkan dari industri pertambangan nikel menjadi sangat banyak. Limbah RB merupakan salah satu limbah industri yang secara visual memiliki sifat atau karakteristik yang hampir sama dengan agregat alami yang dapat digunakan sebagai alternatif material penyusun beton.

RB atau batu bata tahan api merupakan bahan padat dan keras yang memiliki kemampuan untuk mempertahankan fungsi mekanisnya dalam jangka waktu tertentu pada berbagai kondisi termasuk di bawah suhu tinggi maupun pada cairan kimia serta gas korosif (Horckmans *et al.*, 2019). Refraktori dibuat dari berbagai jenis material terutama keramik yang mana termasuk bahan-bahan seperti alumina, lempung (*clay*), magnesia, chromit, silicon karbida dan lain-lain (Fang *et al.*, 1999).

Refraktori alumina tinggi (Al₂O₃) memiliki kandungan alumina di atas 47.5% hal ini sesuai menurut standar ASTM C71 dan digunakan temperatur operasi 2050°C. Beberapa kelompok refraktori yang lain adalah mullite, alumina-chrome, alumina-carbon. Produk refraktori alumina tinggi dengan kandungan alumina antara 70%-80% dimasa fasanya adalah mullite termasuk kategori refraktori mullite

alumina tinggi. Refraktori jenis ini memiliki ketahanan *spalling* yang sangat baik dan ketahanan pembebanan yang tinggi (Fang *et al.*, 1999). Biasanya batu bata tahan api Al_2O_3 dan SiO_2 digunakan sebagai bahan pelapis dinding tungku berputar atau kiln, tungku pengolahan bijih, cerobong asap, dan sektor pengolahan baja yang mempunyai umur yang terbatas sehingga perlu dibongkar dan diganti dengan yang baru (Stjernberg *et al.*, 2012; Ramanenka *et al.*, 2017; Fomenko *et al.*, 2022).

Pemanfaatan kembali limbah batu bata tahan api perlu dilakukan agar tidak menjadi beban lingkungan, karena semakin luasnya areal pembuangan limbah batu bata tentunya akan mengurangi optimalisasi penggunaan lahan saat ini. Pemanfaatan RB sebagai agregat kasar/halus pada beton akan memberi dampak ekonomi yang besar baik bagi perusahaan, pemerintah dan masyarakat sekitar jika mampu digunakan secara meluas. Selain itu, pemanfaatan RB sebagai agregat akan menghemat pemakaian sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui.

Studi tentang eksplorasi penggunaan limbah batu bata tahan api dalam pembuatan beton, maupun mortar telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya yaitu Mohammed Khattab, Hachemi, dan Al-jouni (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. Selanjutnya Ghosh dan Samanta (2023) melakukan studi eksperimental terkait pemanfaatan limbah batu bata tahan api sebagai agregat halus. Campuran beton yang digunakan dengan penggunaan limbah batu bata tahan api sebagai agregat halus dengan presentase 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RBB meningkatkan perilaku tekan pada semua benda uji beton dimana substitusi 10% dan 20% memberikan hasil yang optimal. Hachemi, Khattab, dan Benzetta (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.

Berdasarkan penjabaran tersebut, penulis berinisiatif untuk melakukan penelitian terkait potensi pemanfaatan limbah RB sebagai substitusi parsial agregat

kasar dalam campuran beton. Limbah RB tipe alumina dipilih, mengingat penelitian terkait limbah RB tipe alumina dalam campuran beton masih jarang dilakukan. Selain itu fokus penelitian terdahulu didominasi dengan pemanfaatan limbah batu bata tahan api sebagai substitusi agregat halus, kendatipun ada beberapa penelitian yang menggunakan limbah batu bata tahan api sebagai agregat kasar, namun variasi persentase penggantian yang digunakan masih sangat terbatas. Dan penelitian terdahulu didominasi dengan pengujian kuat tekan sebagai parameter pengujian kualitas beton. Hal inilah yang menyebabkan penulis memilih pemanfaatan RB sebagai agregat kasar dengan parameter pengujian kuat lentur.

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

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Perilaku kuat lentur beton yang mengadopsi limbah *refractory brick* atau batu bata tahan api tipe alumina sebagai substitusi agregat kasar.
2. Pengaruh hubungan beban dan lendutan beton yang mengandung limbah *refractory brick* atau batu bata tahan api tipe alumina sebagai substitusi agregat kasar.
3. Pola keruntuhan beton yang mengandung *refractory brick* atau batu bata tahan api tipe alumina sebagai substitusi agregat kasar terhadap beban lentur.

1.3 Tujuan Penelitian

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

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

3. Menganalisis pola keruntuhan beton yang mengandung *refractory brick* atau batu bata tahan api tipe alumina sebagai substitusi agregat kasar terhadap beban lentur.

1.4 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.

1.5 Ruang Lingkup

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

1. Penelitian yang dilakukan bersifat eksperimental dan dilakukan di laboratorium berdasarkan SNI dan ASTM yang sesuai,
2. Semen yang digunakan adalah jenis semen Portland komposit (PCC) yang tersedia di pasaran,
3. Pasir yang digunakan merupakan hasil dari *crushing* batu yang berasal dari PT. Vale Indonesia,
4. Agregat kasar yang digunakan berasal dari batu pecah PT. Vale Indonesia,
5. Limbah batu bata tahan api yang digunakan merupakan limbah batu bata tahan api tipe alumina dari *furnace sidewall* yang berasal dari PT. Vale Indonesia,
6. Persentase penggunaan limbah batu bata tahan api tipe alumina sebesar 0%, 15%, 30%, dan 50% dari total volume agregat kasar dalam campuran beton,
7. Target mutu beton rencana yaitu 21 MPa dan 25 MPa,
8. Proses perawatan (*curing*) yang dilakukan adalah *curing* air,
9. Pengujian kuat tekan menggunakan sampel berbentuk silinder dengan ukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm, dan 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.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan tesis dengan judul “**PERILAKU LENTUR BALOK TERHADAP PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE ALUMINA SEBAGAI PENGANTI AGREGAT KASAR**”, terbagi menjadi lima (5) 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, *slump*, densitas, kuat tekan beton berbentuk silinder, kuat lentur beton berbentuk balok, UPV, porositas, hubungan beban terhadap lendutan, patahan, dan analisis mikrostruktur beton.

BAB V : 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

2.1 Beton

Menurut SNI 2847-2019, beton merupakan campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). 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 (Nawi, 1998).

2.2 Bahan Penyusun Beton

2.2.1 Semen portland komposit (PCC)

Semen portland komposit (*Portland composite cement* atau PCC) merupakan salah satu jenis semen yang memanfaatkan limbah alam dan industri, yang turut serta mengurangi pencemaran lingkungan dan biaya yang lebih rendah dan emisi selama manufaktur. Menurut SNI 7064-2014, semen portland komposit adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama – sama terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6% - 35% dari massa semen portland komposit. Semen portland komposit dapat digunakan untuk konstruksi umum seperti: pekerjaan beton, pasangan bata, selokan, jalan, pagar dinding dan pembuatan elemen bangunan khusus seperti beton pracetak, beton pratekan, panel beton, bata beton (*paving block*) dan sebagainya.

2.2.2 Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan pada campuran beton, umumnya merupakan agregat yang didapatkan dari hasil disintegrasi alam atau berupa batu pecah hasil

pemecahan batu, dimana agregat kasar turut memberikan andil dalam kekuatan dan mutu dari campuran beton yang dibuat. Berdasarkan SNI 1969-2016 agregat kasar memiliki ukuran butiran antara 4,75 mm sampai 40 mm. Agregat kasar pada campuran beton tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% dari volume agregat, tidak mengandung zat organik yang dapat menyebabkan penurunan pada mutu beton, tidak mengandung bahan reaktif alkali, jumlah butir pipih tidak lebih dari 20% dari berat agregat seluruhnya, memiliki butiran tajam, kuat, dan bersudut, serta memenuhi gradasi butir agregat kasar yang disyaratkan.

2.2.3 Agregat halus (Pasir)

Agregat halus dapat berupa pasir alam, pasir buatan yang berasal dari pecahan batuan secara alami, ataupun campuran dari keduanya. Agregat halus memiliki kegunaan untuk mengisi rongga – rongga yang terbentuk akibat agregat kasar. Agregat halus juga berperan dalam menentukan kemudahan pengerjaan beton, kekuatan dan keawetan beton. Berdasarkan SNI 1969-2016 agregat halus mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm. Agregat halus yang digunakan pada campuran beton hendaknya tidak mengandung kadar lumpur lebih dari 5%, tidak mengandung zat – zat organik yang turut serta mengurangi mutu dari beton, tidak mengandung bahan reaktif alkali, memiliki kehalusan butir pada rentang 2 mm – 5 mm, serta agregat halus terdiri dari butir yang keras dan tidak mudah pecah.

2.2.4 Air

Air merupakan salah satu bahan penyusun beton, yang memiliki peranan penting sebagai pemicu terjadinya proses kimiawi terhadap semen dalam campuran beton. Proses kimiawi yang terjadi antara semen dan air menyebabkan terjadinya proses pengikatan dan pengerasan pada beton setelah melewati rentang waktu tertentu, air juga berperan dalam memudahkan terjadinya pencampuran bahan – bahan penyusun beton lainnya, serta digunakan untuk melakukan perawatan (*curing*) pada beton.

Proporsi air pada campuran beton akan sangat berpengaruh dalam kemudahan pelaksanaan pekerjaan beton dan kekuatan beton, proporsi yang tepat akan memberikan kekuatan beton yang baik, sebaliknya jika proporsi air yang digunakan

pada campuran berlebih maka dapat menyebabkan terjadinya penurunan kekuatan pada beton. Berdasarkan SNI 2847-2019 kelebihan air dalam proses pencampuran dapat mempengaruhi waktu proses, kekuatan dari beton, dan stabilitas volume, serta kemungkinan mengakibatkan perubahan warna pada beton. Kualitas air yang digunakan haruslah berkualitas baik, air yang digunakan pada campuran tidak boleh mengandung ion klorida dalam kadar yang merusak, tidak mengandung larutan asam lainnya, tidak mengandung minyak, garam maupun kandungan – kandungan merugikan yang lain.

2.2.5 Refractory brick (RB)

Refraktori 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. Refraktori sangat diperlukan untuk semua kegiatan yang memerlukan ketahanan terhadap suhu tinggi, misalnya produksi logam, semen, kaca, serta keramik (Horckmans *et al.*, 2019). *Refractory brick* adalah batu bata tahan api yang 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, Karasu and Arslan, 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 atau 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 (Fang, Smith and Peaslee, 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). *Refractory brick* atau batu bata tahan api yang digunakan pada penelitian ini merupakan refraktori tipe alumina dari jenis *furnace (sidewall)* yang berasal dari bekas dinding tungku pembakaran nikel tahan api, yang penggunaannya akan berperan sebagai substitusi parsial agregat kasar pada campuran beton dengan ukuran 10-30 mm melalui pemecahan secara manual mengadopsi palu besi.

2.3 Sifat Mekanik Beton

2.3.1 Kuat tekan beton

Menurut Standar Nasional Indonesia 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).

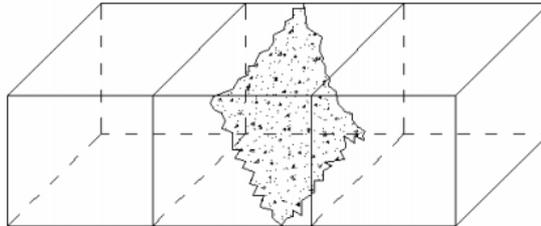
2.3.2 Kuat lentur beton

Menurut Standar Nasional Indonesia 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:

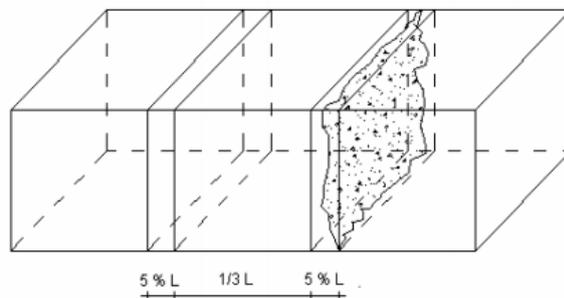
$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (2)$$



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:

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



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

Dimana,

R = kuat lentur (N/mm²)

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.

2.4 Densitas

Pengujian densitas atau 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, 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)

2.5 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. Persamaan 4 memperlihatkan rumus empiris untuk mendapatkan nilai kecepatan rambat gelombang (V).

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

Keterangan :

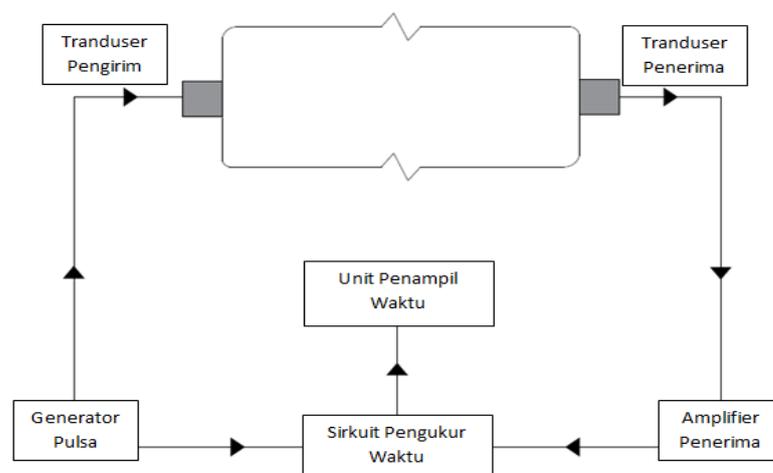
V = *Ultrasonic Pulse Velocity* (km/s)

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)

2.6 Porositas Beton

Salah satu indikator penting untuk menentukan daya tahan beton dan kemampuan ion agresif untuk menembus beton dapat ditentukan dengan 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 C642 - 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)

2.7 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 terjadi pun 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

2. 8 Penelitian Terdahulu

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.

Ghosh dan Samanta (2023) 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 substitusi 10% dan 20% memberikan hasil yang

optimal. Sedangkan untuk pengujian STS diperoleh substitusi 10 – 30% memberikan kinerja yang lebih baik dari benda uji beton lainnya dengan substitusi 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.

Hachemi, Khattab, dan Benzetta (2022) melakukan kajian eksperimental terkait penggunaan limbah batu bata tahan api atau *refractory brick aggregates* (RBA) dan rasio dari air/semen (w/c) terhadap sifat fisik dan mekanik beton. Penelitian dilakukan dengan mengadopsi tiga variasi campuran, yaitu variasi pertama adalah beton biasa yang terbuat dari 100% agregat alami atau *natural aggregate* (NA), variasi kedua adalah beton dibuat dengan mengganti 20% NA kasar menjadi RBA kasar, sedangkan variasi ketiga beton dibuat dengan mengganti 20% NA kasar dan halus menjadi RBA kasar dan halus. Tiga rasio air/semen (w/c) digunakan pada campuran yaitu 0.59, 0.47, serta 0.38. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini berupa kuat tekan, modulus elastisitas dinamis, porositas air, densitas, penyerapan air, dan *ultrasonic pulse velocity* (UPV). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RBA dalam campuran beton menghasilkan kinerja yang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan beton biasa. Penurunan nilai UPV, penyerapan air, modulus elastisitas dinamis beton, dan porositas yang dibuat mengadopsi variasi 20% RBA kasar dan halus lebih tinggi dibandingkan beton yang dibuat mengadopsi variasi 20% RBA kasar. Akan tetapi, substitusi 20% RBA kasar dan halus memberikan peningkatan kuat tekan dan kepadatan beton. Selain itu, diperoleh bahwa penggunaan rasio w/c yang lebih rendah menghasilkan porositas beton yang lebih rendah yang memberikan dampak terhadap peningkatan kinerja beton.

Khattab, Hachemi, dan Al Ajlouni (2021) melakukan studi eksperimental tentang pengaruh peningkatan suhu terhadap sifat fisik dan mekanik beton yang dibuat dengan substitusi 20% limbah batu bata tahan api (RBA) terhadap agregat kasar alami (NCA), dan dibandingkan dengan beton biasa yang terbuat dari 100% NCA. Penelitian ini mengadopsi dua tipe RBA yaitu RBA yang telah digunakan dan RBA yang belum digunakan dengan tiga variasi rasio air/semen (w/c) yaitu 0.59, 0.47, dan 0.38 untuk pembuatan campuran beton. Spesimen dipanaskan

dengan laju $3^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ dari 20°C hingga 800°C kemudian dipertahankan selama 1 jam saat memperoleh suhu yang diinginkan, dan didinginkan sampai mencapai suhu kamar. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah kuat tekan, *ultrasonic pulse velocity*, modulus elastisitas dinamis, kepadatan, kehilangan berat, porositas, perubahan volume, dan tingkat kerusakan sebelum dan sesudah dilakukannya pemanasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RBA merupakan alternatif potensial untuk menggantikan NCA dalam campuran beton, serta penggunaan 20% RBA sebagai NCA dapat membantu mempertahankan sifat – sifat beton setelah dilakukan pemanasan.

Khattab, Hachemi, dan Al Ajlouni (2021) melakukan penelitian eksperimental terkait penggunaan limbah batu bata tahan api (RBA) sebagai substitusi agregat kasar dan halus menggantikan agregat alam (NA). Penelitian ini mengadopsi dua campuran beton, variasi pertama terbuat dari NA kasar dan halus yang berperan sebagai beton referensi, variasi kedua terbuat dari 20% NA kasar dan halus dengan RBA. Setiap variasi mengadopsi tiga jenis dosis semen yaitu 350 kg/m^3 , 400 kg/m^3 , dan 450 kg/m^3 . Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini berupa kuat tekan, *ultrasonic pulse velocity*, kepadatan, dan porositas. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan RBA sebagai substitusi agregat kasar dan halus dalam campuran beton turut meningkatkan nilai kuat tekan, sedangkan untuk kepadatan beton nilai yang diperoleh sedikit menurun, serta terhadap *ultrasonic pulse velocity* dan porositas RBA memberikan pengaruh yang relatif. Berdasarkan hasil penelitian ini, penggunaan RBA sebagai agregat kasar dan halus dalam campuran beton menghasilkan karakteristik yang dapat diterima.

Mohammed Khattab, Hachemi, dan Al-jouni (2021) melakukan studi eksperimental tentang sifat mekanik dan fisik beton yang dibuat dari substitusi agregat limbah batu bata tahan api (RBA) yang didapatkan dari pabrik semen menggantikan agregat kasar alami, dengan fraksi ukuran 5/25 mm. Penelitian ini mengadopsi dua parameter, yaitu persentase substitusi RBA sebesar 10, 20, 30, 40, 50, 70, dan 100%, dan rasio air/semen yang digunakan adalah 0.59 serta 0.38. Pengujian yang dilakukan terdiri dari kuat tekan, *ultrasonic pulse velocity*, modulus elastisitas dinamis, densitas, dan porositas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan rasio substitusi RBA terhadap agregat kasar alami menyebabkan

penurunan kinerja beton. Akan tetapi, beton dapat diproduksi dengan mengadopsi substitusi RBA sampai 30% untuk mencapai properti yang berkualitas baik dan dapat diterima.

Mohammed Khattab dan Hachemi (2021) melakukan eksperimen untuk mengevaluasi sifat fisik dan mekanik beton yang mengadopsi 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 substitusi agregat kasar alami (NCA) dalam campuran beton. Penelitian ini mengadopsi tingkat substitusi sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 70%, 100% berdasarkan volume agregat limbah batu bata tahan api. Setiap jenis persen RBA mengadopsi 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 biasa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RBA-2 memiliki kinerja yang lebih baik daripada RBA-1, dan secara umum dapat diperoleh bahwa beton dapat diproduksi mengadopsi 20% RBA untuk mencapai beton dengan kualitas yang baik.

Zeghad *et al.* (2017) melakukan penelitian eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan limbah batu bata tahan api (RWB) sebagai bahan pelengkap pada semen dengan substitusi total silica fume, untuk menghasilkan beton bertulang berbasis serat kinerja tinggi (HPFRC). Penelitian ini mengadopsi 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 dan 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 mengadopsi batu bata pecah baik sebagai agregat kasar maupun agregat halus mungkin untuk dilakukan, karena karakteristik beton mengadopsi 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.