

TESIS

**PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN
API TIPE ALUMINA TERHADAP PERILAKU BETON
AKIBAT BEBAN TEKAN**

*The Effect of the Use of Waste Refractory Bricks Alumina Type on
Concrete Behavior due to Compressive Loads*

**UMMULCHAIR JUREJE
D012221019**



**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE ALUMINA TERHADAP PERILAKU BETON AKIBAT BEBAN TEKAN

Tesis

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

Disusun dan diajukan oleh

UMMULCHAIR JUREJE
D012221019

Kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023

TESIS

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE ALUMINA TERHADAP PERILAKU BETON AKIBAT BEBAN TEKAN

UMMULCHAIR JUREJE
D012221019

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 23 November 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



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

Pembimbing Pendamping



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

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



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

Ketua Program Studi



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

**PERNYATAAN KEASLIAN TESIS
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Ummulchair Jureje
Nomor mahasiswa : D012221019
Program studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Pengaruh Penggunaan Limbah Batu Bata Tahan Api Tipe Alumina Terhadap Perilaku Beton Akibat Beban Tekan” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng dan Dr. Eng. M. Akbar Caronge, 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 Engineering TRANSACTIONS A: Basics* dengan status *under review (revision stage)* sebagai artikel dengan judul “*Basic Engineering Properties of Concrete with Refractory Brick as Coarse Aggregate: Compressive Stress-Time Relationship Assessment.*”

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

Gowa, 27 November 2023

Yang menyatakan,


Ummulchair Jureje

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang. Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah Yang Maha Esa, karena atas berkat limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga kami dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini dengan baik dan tepat pada waktunya. Dalam tesis ini, kami akan membahas mengenai **“PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE ALUMINA TERHADAP PERILAKU BETON AKIBAT BEBAN TEKAN”** yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi Magister pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Kami menyampaikan penghargaan sangat tinggi dan mendalam 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. **Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng** selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan selaku pembimbing I yang selalu memberikan arahan dan petunjuk dalam penyusunan Tesis ini.
4. **Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng** selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan pengarahan dalam proses penyusunan Tesis ini.
5. **Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT, Dr. Ir. Muh. Asad Abdurrahman, ST., M.Eng. PM, IPM, Dr. Eng. Fakhruddin, ST., M.Eng** selaku penguji.
6. **Prof. Dr. Eng. Ir. Rudy Djamaluddin, ST, M. Eng.** selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
7. Seluruh dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. **Teman-teman laboratorium riset *eco-material* (pororo, deti, vira, kak niar, zair, kak risal, kak komang, kak erwin, kak haerul, dkk)** dan laboran laboratorium struktur dan bahan yang turut membantu dalam proses penelitian.
9. Teman – teman **angkatan 20221** terkhusus magister KKD struktur yang telah memberikan dukungan dan dorongan selama masa studi.
10. 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 **papa (Jureje Husen)** dan **mama (Huzaipah)**. Terima kasih banyak atas doa, kasih sayang, nasehat, dan segala dukungan yang telah diberikan sampai saat ini dan nanti. Mudah – mudahan ummul bisa menjadi anak sholehah dan berbakti kepada kedua orang tua, serta dapat papa mama banggakan di dunia dan akhirat, aamiin.
2. Kedua kakakku tersayang yaitu **Husnul Khatimah**, dan **Magfiratul Isnaini J.H**, serta adikku tersayang **Muh. Fathir Jureje**. Terima kasih telah menjadi orang-orang yang turut menguatkan ummul dalam menjalani kehidupan jauh dari keluarga, semangat, doa, dan dukungan lainnya yang turut membantu dalam penyelesaian tesis ini. Semoga kita bersaudara sukses di dunia dan akhirat, aamiin.
3. Ponakan – ponakanku yang tersayang, yaitu **Muhammad Uwais Al Arifi**, **Hana Fakhira Mustapa**, dan **Muhammad Bilal Abdurrahman**. Terima kasih sudah jadi *rechargenya* tante mumu di saat lelah, suara dan raut wajah kalian sangat menyenangkan hati. Semoga ponakan – ponakanku tumbuh jadi anak yang sholeh, sholehah dan berakhlak mulia, aamiin.
4. **Oktaviani Ayu Mantika**, sahabatku tersayang tempatku berbagi, dan saling menguatkan satu sama lain menghadapi berbagai macam masalah hidup, Mudah – mudahan suatu saat ummul dan emon bisa ikut kajian dan belanja pakaian syar'i bersama, aamiin. *I hope the best for you.*
5. **Deti**, sahabatku yang sangat membantu ummul menjalani kehidupan magister. Kata andalannya “Jangan terlalu pusing, ini hanya dunia”.
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.

Makassar, 27 November 2023
Penulis,

Ummulchair Jureje

ABSTRAK

UMMULCHAIR JUREJE. *Pengaruh Penggunaan Limbah Batu Bata Tahan Api Tipe Alumina Terhadap Perilaku Beton Akibat Beban Tekan* (dibimbing oleh **M. Wihardi Tjaronge dan Akbar Caronge**)

Pemanfaatan limbah industri konstruksi sebagai pengganti agregat dalam campuran beton perlu untuk dilakukan dalam rangka penanganan terhadap eksploitasi material alam dan membantu untuk optimasi lahan akibat limbah industri konstruksi yang terus meningkat. Limbah batu bata tahan api (RB) merupakan salah satu jenis limbah yang berpotensi untuk digunakan sebagai pengganti agregat alami. Oleh karena itu, penelitian eksperimental dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan limbah RB sebagai agregat kasar dengan persentase penggantian sebesar 0%, 15%, 30%, dan 50% dalam produksi beton. Dua target mutu ($f'c = 21$ MPa, $f'c = 25$ MPa) digunakan untuk memproduksi beton. Selanjutnya dilakukan pengujian beton untuk mengetahui nilai slump, kuat tekan, kurva hubungan tegangan regangan, modulus elastisitas, toughness, pola retak, dan analisis mikrostruktur ITZ. Beton 0%RB (NC) berperan sebagai pembanding. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan penggunaan RB dalam produksi beton memberikan kontribusi positif terhadap nilai slump, dan tidak merubah pola perilaku pengembangan kurva hubungan tegangan regangan. Sedangkan nilai kuat tekan, modulus elastisitas, dan toughness secara umum menunjukkan penurunan seiring dengan peningkatan penggunaan RB dalam produksi beton. Selain itu, penggunaan RB tidak memberikan pengaruh spesifik terhadap pola retak, dan analisis mikrostruktur ITZ menunjukkan material RB dapat melekat dengan baik pada matriks semen. Berdasarkan analisis seluruh hasil pengujian, 15%RB menunjukkan perolehan yang lebih baik dibandingkan variasi 30%RB, dan 50%RB dari kedua target mutu beton. Dapat disimpulkan, penggunaan 15%RB sebagai pengganti agregat kasar merupakan alternatif potensial yang layak untuk memproduksi beton berkelanjutan.

Kata kunci: batu bata tahan api, kuat tekan, hubungan tegangan regangan, beton berkelanjutan

ABSTRACT

UMMULCHAIR JUREJE. *The Effect of the Use of Waste Refractory Bricks Alumina Type on Concrete Behavior due to Compressive Loads* (supervised by **M. Wihardi Tjaronge dan Akbar Caronge**)

The utilization of construction waste as a substitute for aggregate in concrete mixes is needed to deal with the exploitation of natural materials and aid in the optimization of land due to the increasing construction waste. Refractory brick (RB) waste is a type of waste that has the potential to be utilized as a substitute for natural aggregate. Therefore, experimental research was conducted to ascertain the impact of utilizing RB waste as coarse aggregate in the production of concrete with replacement percentages of 0%, 15%, 30%, and 50%. Concrete is produced using two quality targets ($f'_c = 21$ MPa and $f'_c = 25$ MPa). Concrete testing is then performed to assess the slump value, compressive strength, stress-strain relationship curve, elastic modulus, toughness, crack pattern, and ITZ microstructure analysis. Concrete 0%RB (NC) is utilized as a comparison. The test results demonstrate that increasing the amount of RB in concrete production makes a positive contribution to the slump value and does not change the behavioral pattern in the development of the stress-strain relationship curve. Meanwhile, the values for compressive strength, elastic modulus, and toughness tend to decline as RB utilization in the production of concrete increases. In addition, the utilization of RB has no particular impact on crack patterns, and ITZ microstructure analysis demonstrates that RB material can adhere well to the cement matrix. According to the analysis of all test results, 15%RB performs better than the 30%RB and 50%RB variants of the two concrete quality targets. It can be concluded that utilizing 15%RB as a substitute for coarse aggregate is a potentially viable alternative for producing sustainable concrete.

Keywords: refractory bricks, compressive strength, stress-strain relationship, sustainable concrete

DAFTAR ISI

	<u>Halaman</u>
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xv
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Tujuan Penelitian	3
I.4 Manfaat Penelitian.....	4
I.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
II.1 Beton	5
II.2 Bahan Penyusun Beton.....	5
II.2.1 Semen portland.....	5
II.2.2 Semen portland komposit (PCC).....	6
II.2.3 Air.....	7
II.2.4 Agregat halus.....	7
II.2.5 Agregat kasar.....	8
II.2.6 Batu bata tahan api atau <i>refractory brick</i> (RB)	9
II.3 Sifat Mekanis Beton	10
II.3.1 Kuat tekan beton	10
II.3.2 Hubungan tegangan regangan beton.....	11
II.3.3 Modulus elastisitas.....	13

II.3.4 Toughness	14
II.3.5 Model eksisting hubungan kurva tegangan regangan beton	14
II.4 Pola Retak Beton	15
II.5 Penelitian Terdahulu	16
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	21
III.1 Tahapan Penelitian	21
III.2 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	23
III.3 Jenis dan Sumber Penelitian.....	23
III.4 Alat dan Bahan Penelitian	23
III.4.1 Alat	23
III.4.2 Bahan	24
III.5 Pemeriksaan Karakteristik Material	25
III.6 Rancangan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>).....	25
III.7 Pembuatan Benda Uji.....	26
III.8 Pemeriksaan <i>Slump Test</i> pada Beton.....	27
III.9 Perawatan Benda Uji	28
III.10 Pengujian Benda Uji.....	29
III.10.1 Pengujian kuat tekan beton silinder	29
III.10.2 Pengujian modulus elastisitas beton	29
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
IV.1 Karakteristik Material.....	31
IV.2 Slump Beton	32
IV.3 Kuat Tekan Beton.....	35
IV.4 Hubungan Tegangan Regangan Beton (<i>S – S – C</i>)	37
IV.5 Modulus Elastisitas Beton	41
IV.6 Regangan Elastis Beton	44
IV.7 Regangan Puncak Beton	45
IV.8 Regangan Ultimit Beton	46
IV.9 Nilai Toughness Beton	47
IV.10 Perbandingan Hubungan Tegangan Regangan Beton (<i>S – S – C</i>) dan Model Eksisting	49
IV.11 Pola Retak Beton	51

IV.12 Analisis Mikrostruktur ITZ	55
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	58
V.1 Kesimpulan.....	58
V.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN.....	65

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel 1. Batas – batas dari gradasi agregat halus.....	8
Tabel 2. Batas – batas dari gradasi agregat kasar.....	9
Tabel 3. Standar rujukan pemeriksaan karakteristik agregat.....	25
Tabel 4. Rancangan campuran beton (<i>mix design</i>).....	26
Tabel 5. Tabel identifikasi benda uji beton	27
Tabel 6. Karakteristik fisik agregat kasar batu pecah.....	31
Tabel 7. Karakteristik fisik agregat kasar limbah batu bata tahan api (RB) tipe alumina.....	31
Tabel 8. Karakteristik fisik agregat halus.....	31

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
Gambar 1. Kurva hubungan tegangan regangan tipikal beton	11
Gambar 2. Grafik hubungan tegangan regangan	12
Gambar 3. Area toughness di bawah kurva tegangan-regangan	14
Gambar 4. Pola retak atau kehancuran pada benda uji beton.....	16
Gambar 5. Diagram alir penelitian	22
Gambar 6. Bahan campuran beton	25
Gambar 7. Proses pembuatan benda uji beton.....	27
Gambar 8. Pemeriksaan uji slump beton	28
Gambar 9. Perawatan (<i>curing</i>) benda uji beton.....	28
Gambar 10. Pengujian kuat tekan.....	29
Gambar 11. Pengujian modulus elastisitas	30
Gambar 12. Gradasi ukuran butiran agregat.....	32
Gambar 13. Hasil uji slump beton segar dari campuran beton dengan persentase penggunaan RB yang berbeda	33
Gambar 14. Tampilan visual hasil uji slump beton segar	33
Gambar 15. Kuat tekan beton untuk persentase penggunaan RB yang berbeda .	35
Gambar 16. Grafik hubungan tegangan dan regangan dengan persentase penggunaan RB yang berbeda untuk target mutu $f^c = 21$ MPa.....	38
Gambar 17. Grafik gabungan hubungan tegangan dan regangan rata – rata dengan persentase penggunaan RB yang berbeda untuk target mutu $f^c = 21$ MPa	38
Gambar 18. Grafik hubungan tegangan dan regangan dengan persentase penggunaan RB yang berbeda untuk target mutu $f^c = 25$ MPa.....	39
Gambar 19. Grafik gabungan hubungan tegangan dan regangan rata – rata dengan persentase penggunaan RB yang berbeda untuk target mutu $f^c = 25$ MPa	39
Gambar 20. Grafik perwakilan fase – fase hubungan tegangan dan regangan....	40
Gambar 21. Perbandingan modulus elastisitas eksperimental dan teori untuk target mutu $f^c = 21$ MPa terhadap variasi penggunaan RB dalam campuran beton	42

Gambar 22. Perbandingan modulus elastisitas eksperimental dan teori untuk target mutu $f^c = 25$ MPa terhadap variasi penggunaan RB dalam campuran beton	42
Gambar 23. Regangan elastis yang diperoleh dari variasi penggunaan RB pada campuran beton.....	44
Gambar 24. Regangan puncak yang diperoleh dari variasi penggunaan RB pada campuran beton.....	45
Gambar 25. Regangan ultimit yang diperoleh dari variasi penggunaan RB pada campuran beton.....	47
Gambar 26. Nilai toughness pada setiap variasi campuran beton	48
Gambar 27. Grafik perbandingan S – S – C dan model eksisting dengan persentase penggunaan RB yang berbeda untuk target mutu $f^c = 21$ MPa	49
Gambar 28. Grafik gabungan perbandingan S – S – C dan eksisting model semua variasi campuran beton untuk target mutu $f^c = 21$ MPa	50
Gambar 29. Grafik perbandingan S – S – C dan eksisting model dengan persentase penggunaan RB yang berbeda untuk target mutu $f^c = 25$ MPa	50
Gambar 30. Grafik gabungan perbandingan S – S – C dan eksisting model semua variasi campuran beton untuk target mutu $f^c = 25$ MPa.....	51
Gambar 31. Pola kehancuran benda uji beton pada umur 7 hari untuk target mutu $f^c = 21$ MPa untuk semua variasi campuran beton.....	52
Gambar 32. Pola kehancuran benda uji beton pada umur 28 hari untuk target mutu $f^c = 21$ MPa untuk semua variasi campuran beton.....	53
Gambar 33. Pola kehancuran benda uji beton pada umur 7 hari untuk target mutu $f^c = 25$ MPa untuk semua variasi campuran beton.....	54
Gambar 34. Pola kehancuran benda uji beton pada umur 28 hari untuk target mutu $f^c = 25$ MPa untuk semua variasi campuran beton	55
Gambar 35. Hasil pengujian SEM beton kontrol (NC)	55
Gambar 36. Hasil pengujian SEM beton 15%RB	56

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Singkatan/symbol	Arti dan keterangan
RB	= limbah batu bata tahan api atau <i>refractory brick</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	= gaya tekan aksial dari mesin tekan (N)
A	= luas penampang melintang benda uji (mm ²)
E_c	= modulus elastisitas beton (MPa)
S_2	= tegangan pada saat 40% dari beban maksimum beton (MPa)
S_1	= tegangan pada saat regangan mencapai $\epsilon_1 = 0,00005$ (MPa)
ϵ_2	= regangan yang dihasilkan pada saat S_2
σ	= tegangan (MPa)
ϵ	= regangan (mm/mm)
ϵ_0	= regangan prediksi (mm/mm)
UTM	= <i>universal testing machine</i>
SNI	= standar nasional indonesia
ASTM	= <i>american society for testing and materials</i>
NC	= beton kontrol
SSC	= kurva hubungan tegangan regangan
SEM	= <i>scanning electron microscopy</i>
ITZ	= <i>interfacial transition zone</i>
C – S – H	= kalsium silikat hidrat

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton adalah material konstruksi yang sangat banyak digunakan terutama pada pembangunan berbagai macam infrastruktur dari skala kecil sampai dengan skala besar. Air, semen, agregat kasar, agregat halus dan bahan campuran tambahan jika diperlukan, adalah komponen penyusun utama beton. Pada umumnya proporsi agregat dalam campuran beton yang diproduksi sekitar 60 – 75% dari volume keseluruhan, dengan proporsi agregat kasar sekitar 45% (Cachim, 2009; Meddah, Zitouni and Belâabes, 2010). Setiap tahun, sekitar 13.12 miliar ton agregat alami digunakan secara global (Mohammed *et al.*, 2015). Melihat besarnya jumlah agregat alami yang dibutuhkan dalam produksi beton, menunjukkan bahwa beton harus menerapkan pilihan beton yang berkelanjutan.

Sementara itu, limbah dari industri konstruksi diestimasi sebesar 75 juta ton setiap tahunnya (Kaarthik dan Maruthachalam, 2020). Daur ulang limbah industri konstruksi mungkin bisa dijadikan pilihan sebagai salah satu kegiatan keberlanjutan ekonomi dan sekaligus konservasi terhadap lingkungan untuk mencegah terjadinya bencana alam. Limbah konstruksi dan pembongkaran, fly ash, silica fume, berbagai slag, abu sekam padi, limbah karet, limbah batu bata tahan api (*refractory brick*) merupakan diantara jenis – jenis limbah yang telah diteliti dapat digunakan untuk menggantikan material komposisi utama penyusun beton sampai presentasi tertentu dalam produksi beton yang berkelanjutan. Selain jenis limbah tersebut, Caronge *et al.* (2022) menemukan bahwa limbah padat dari teh dengan penggunaan sampai 10% sebagai pengganti semen dalam produksi beton berkelanjutan, menghasilkan kekuatan yang mirip dengan beton kontrol yang menggunakan semen Portland.

Batu bata tahan api atau *refractory brick* 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. Batu bata tahan api umumnya digunakan pada cerobong asap, perapian, maupun tungku pembakaran nikel. Dalam siklus penggunaannya, batu bata tahan api harus dibongkar dan diganti

dengan yang baru. Kegiatan rutin pembongkaran ini menyebabkan banyaknya limbah batu bata tahan api yang dibuang setiap tahunnya. Menurut Horckmans *et al.* (2019), sekitar 28 juta ton limbah batu bata tahan api dihasilkan per tahun. Sementara limbah batu bata tahan api termasuk dalam limbah keramik (batu bata termasuk dalam subkelompok keramik) yang diklasifikasikan sebagai jenis limbah *nonbiodegradable* atau limbah dengan periode dekomposisi yang lama yaitu 4000 tahun lamanya (Baradaran-Nasiri dan Nematzadeh, 2017). Areal pembuangan dari limbah batu bata yang terus meluas tentunya akan mengurangi optimasi pemanfaatan lahan yang ada, hal ini menunjukkan bahwa perlunya dilakukan pemanfaatan kembali limbah batu bata tahan api dalam rangka agar tidak menjadi beban bagi lingkungan di sekitarnya. Studi tentang eksplorasi penggunaan limbah batu bata tahan api dalam pembuatan beton, maupun mortar telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya (Kavas, Karasu and Arslan, 2006; Saidi *et al.*, 2015; Aboutaleb *et al.*, 2017).

Nematzadeh dan 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. Selanjutnya Khattab, Hachemi dan Al Ajlouni (2021) 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. 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. Zeghad *et al.* (2017) memperoleh bahwa limbah

batu bata tahan api berpotensi digunakan sebagai bahan semen atau tambahan dalam produksi beton.

Berdasarkan penjabaran tersebut, penulis berinisiatif untuk melakukan penelitian terkait potensi pemanfaatan limbah batu bata tahan api sebagai substitusi parsial agregat kasar dalam campuran beton. Limbah batu bata tahan api tipe alumina dipilih, mengingat penelitian terkait limbah batu bata tahan api 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. Hal inilah yang menyebabkan penulis memilih pemanfaatan limbah batu bata tahan api sebagai agregat kasar.

Adapun judul yang diangkat oleh penulis adalah “**Pengaruh Penggunaan Limbah Batu Bata Tahan Api Tipe Alumina Terhadap Perilaku Beton Akibat Beban Tekan**”

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat dirumuskan beberapa pokok permasalahan penelitian sebagai berikut:

1. Perilaku kuat tekan beton yang menggunakan limbah batu bata tahan api tipe alumina sebagai substitusi agregat kasar?
2. Pengaruh limbah batu bata tahan api tipe alumina sebagai substitusi agregat kasar terhadap hubungan tegangan dan regangan beton dibawah beban tekan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijabarkan sebelumnya, maka tujuan yang diharapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis perilaku kuat tekan beton yang menggunakan limbah batu bata tahan api tipe alumina sebagai substitusi agregat kasar,

2. Mengevaluasi pengaruh limbah batu bata tahan api tipe alumina sebagai substitusi agregat kasar terhadap hubungan tegangan dan regangan beton dibawah beban tekan.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini yaitu selain untuk menambah ilmu pengetahuan, juga sebagai langkah untuk mengurangi salah satu limbah industri berupa limbah batu bata tahan api 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

Adapun dalam penelitian ini, ruang lingkup permasalahan dibatasi pada:

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 dan modulus elastisitas menggunakan sampel berbentuk silinder dengan ukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm yang diuji pada umur 7 dan 28 hari.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Menurut SNI 2847 (2019), beton adalah campuran antara agregat halus, agregat kasar, air, semen portland atau semen hidrolis lainnya, dan dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Seiring dengan meningkatnya umur beton, maka beton yang telah dibuat juga akan semakin mengeras dan mencapai kekuatan rencana dalam waktu sekitar 28 hari. Komposisi dari campuran beton akan sangat berpengaruh terhadap kekuatan beton yang dihasilkan. Menurut Nawy (1998), tolak ukur yang mempengaruhi kualitas beton adalah sebagai berikut:

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.

2.2 Bahan Penyusun Beton

Kualitas dari beton dapat ditentukan salah satunya melalui pemilihan bahan – bahan penyusun beton yang baik, perhitungan proporsi campuran yang tepat, metode pengerjaan yang benar, perawatan beton yang mengikuti standar yang berlaku, dan pemilihan bahan tambah dengan takaran yang sesuai apabila diperlukan.

2.2.1 Semen portland

Semen memiliki fungsi untuk merekatkan butiran agregat agar terbentuk massa yang kompak atau padat dan untuk mengisi celah – celah diantara butiran agregat. Bahan yang hendak mengeras apabila bereaksi dengan air disebut dengan

semen hidrolik. Diantara tipe semen yang biasa digunakan dalam campuran beton adalah semen portland.

Menurut SNI 2049 (2015), semen portland adalah semen hidrolis yang diperoleh dari penggilingan terak semen portland dengan kandungan utama berupa kalsium silikat yang bersifat hidrolis serta digiling secara bersamaan dengan satu bahan tambahan atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambah lain. Berdasarkan jenis dan penggunaannya, semen portland terdiri atas:

1. Jenis I adalah semen portland dengan peruntukan umum dan tidak membutuhkan kualifikasi khusus sebagaimana yang disyaratkan pada jenis lainnya;
2. Jenis II adalah semen portland yang dalam pemanfaatannya membutuhkan ketahanan terhadap sulfat atau kalor dengan hidrasi menengah atau sedang;
3. Jenis III adalah semen portland yang dalam pemanfaatannya membutuhkan kekuatan tinggi pada fase pendahuluan setelah terjadi pengikatan;
4. Jenis IV adalah semen portland yang dalam pemanfaatannya membutuhkan kalor dengan hidrasi rendah;
5. Jenis V adalah semen portland yang dalam pemanfaatannya membutuhkan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

2.2.2 Semen portland komposit (PCC)

Semen portland komposit (*Portland composite cement* atau PCC) merupakan salah satu jenis semen yang memiliki karakteristik mirip dengan semen Portland, namun kelebihan jenis semen ini adalah lebih ramah lingkungan karena turut serta mengurangi emisi CO₂ serta biaya yang lebih rendah. Beberapa peneliti sebelumnya seperti Caronge *et al.* (2017) dan Mansyur *et al.* (2022) menemukan bahwa penggunaan PCC dapat menghasilkan kinerja beton yang baik.

Menurut SNI 7064 (2014), semen portland komposit adalah bahan pengikat hidrolis dari hasil penggilingan bersama terak semen portland dan gips menggunakan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik

tersebut antara lain pozolan, terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), batu kapur, senyawa silikat, dengan kadar total bahan anorganik 6 % - 35 % dari massa semen portland komposit. Pada umumnya semen portland komposit dapat digunakan untuk konstruksi umum seperti: selokan, pekerjaan beton, jalan, pasangan bata, pagar dinding dan pembuatan elemen bangunan khusus seperti beton pracetak, beton pratekan, panel beton, bata beton (*paving block*) dan sebagainya.

2.2.3 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.

2.2.4 Agregat halus

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 1970 (2008) agregat halus

mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm (saringan No. 4). 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, agregat halus terdiri dari butir yang keras dan tidak mudah pecah. Selain itu menurut ASTM C33 (2003), agregat halus memiliki modulus kehalusan butir pada rentang 2.3 – 3.1.

Menurut SNI 03-2834 (2000), distribusi ukuran butir agregat halus diklasifikasikan menjadi empat kategori, yaitu pasir kasar (gradasi no. 1), pasir sedang (gradasi no. 2), pasir agak halus (gradasi no. 3), pasir halus (gradasi no. 4). Batas – batas dari gradasi agregat halus ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Batas – batas dari gradasi agregat halus

Nomor saringan	Ukuran saringan (mm)	% Lolos saringan			
		Pasir kasar	Pasir sedang	Pasir agak halus	Pasir halus
3/8"	9.6	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100
No. 4	4.8	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
No. 8	2.4	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100
No. 16	1.2	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
No. 30	0.6	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
No. 50	0.3	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
No. 100	0.15	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15

2.2.5 Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan pada campuran beton, umumnya merupakan agregat yang didapatkan dari hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah dari hasil pemecahan batu. Karakteristik dari agregat kasar akan turut mempengaruhi kekuatan akhir dari beton keras dan ketahanannya terhadap deteriorasi beton, cuaca, maupun dampak dari perusak lainnya. 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 berat kering, tidak mengandung zat organik yang dapat menyebabkan penurunan pada mutu beton, tidak mengandung bahan reaktif alkali, jumlah butir pipih ditambah agregat panjang tidak lebih dari 20% dari berat agregat seluruhnya, memiliki butiran tajam, kuat, dan bersudut, serta memenuhi gradasi butir agregat kasar yang disyaratkan.

Menurut SNI 03-2834 (2000), distribusi ukuran butir agregat kasar diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu ukuran maksimum 10 mm, ukuran maksimum 20 mm, dan ukuran maksimum 40 mm. Batas – batas dari gradasi agregat kasar ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Batas – batas dari gradasi agregat kasar

Nomor saringan	Ukuran saringan (mm)	Ukuran maks. 10 mm	% Lolos saringan	
			Ukuran maks. 20 mm	Ukuran maks. 40 mm
3"	76			100 – 100
1½"	38		100 – 100	95 – 100
¾"	19	100 – 100	95 – 100	35 – 70
3/8"	9.6	50 – 85	30 – 60	10 – 40
No. 4	4.8	0 – 10	0 – 10	0 – 5

2.2.6 Batu bata tahan api atau *refractory brick*

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, Karasu dan 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, 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, Smith dan 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).

2.3 Sifat Mekanis Beton

2.3.1 Kuat tekan beton

Kuat tekan beton merupakan tolak ukur kemampuan beton untuk menerima gaya tekan yang diberikan per satuan luas penampang. Tinggi dan rendahnya kuat tekan beton, berbanding lurus dengan kekuatan struktur yang diinginkan. Menurut Nawy (1998), kuat tekan beton bergantung pada beberapa faktor, diantaranya adalah jenis campuran yang digunakan, karakteristik dari agregat, serta lama dan kualitas dari perawatan (*curing*).

Menurut SNI 1974 (2011), nilai kuat tekan beton adalah besarnya perbandingan antara beban maksimum yang diterima oleh benda uji beton selama pengujian per satuan luas penampang benda uji. Pembebanan yang diberikan secara kontinu pada benda uji beton dapat menyebabkan benda uji beton mengalami kehancuran bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan dari mesin uji tekan. Nilai kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan persamaan 1, sebagai berikut:

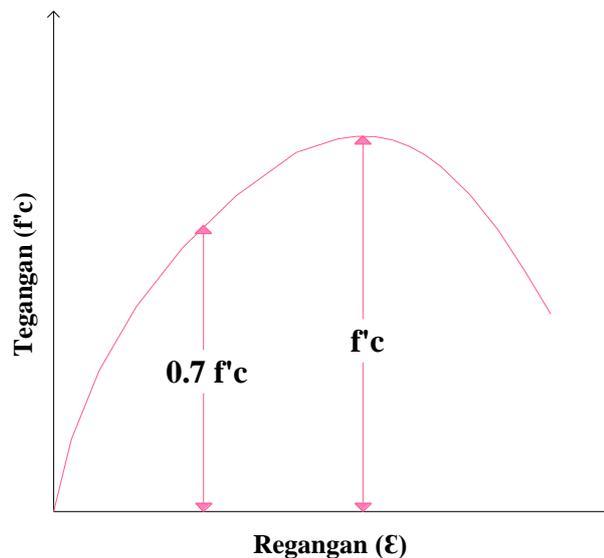
$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dengan pengertian:

- $f'c$ = Kuat tekan beton benda uji silinder (MPa atau N/mm²)
- P = Gaya tekan aksial dari mesin tekan (N)
- A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

2.3.2 Hubungan tegangan regangan beton

Hubungan tegangan regangan beton penting untuk diketahui untuk menurunkan persamaan – persamaan dalam rangka keperluan analisis dan desain pada struktur beton. Gambar 1, menunjukkan kurva tegangan regangan tipikal beton dibawah pembebanan tekan uniaksial selama beberapa menit. Menurut Nawy (1998), pada tahap pertama dari kurva tersebut sampai kurang lebih 40% dari tegangan puncak dapat dianggap sebagai linier. Kemudian saat mendekati 70% dari tegangan puncak, terjadi kehilangan kekakuan dari material yang diuji yang ditandai dengan ketidaklinieran pada kurva. Pada beban batas, terjadi retak yang sama dengan arah pada beban sehingga menjadi sangat terlihat dan pada umumnya semua benda uji beton (kecuali untuk yang memiliki kekuatan rendah) akan lekas hancur.



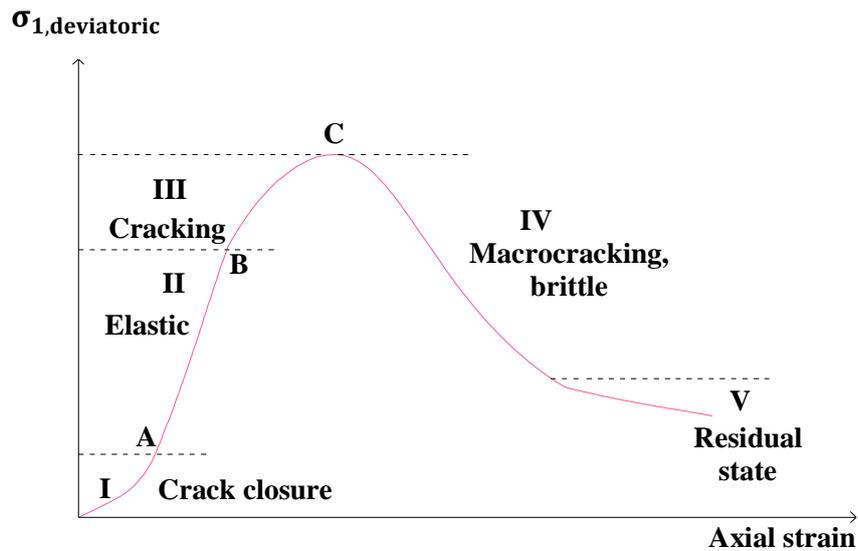
Gambar 1 Kurva hubungan tegangan regangan tipikal beton

Dari kurva hubungan tegangan regangan beton, dapat diindikasikan bahwa:

1. Peningkatan pada regangan puncak berbanding terbalik dengan kekuatan beton;
2. Peningkatan pada kekuatan tekan beton menyebabkan panjang bagian linier dari kurva akan semakin bertambah;
3. Peningkatan kekuatan beton akan menyebabkan reduksi daktilitas.

Menurut Wang dan Salmon (1993) regangan tekan yang diperoleh saat tegangan maksimum tercapai, berada di antara 2.000 – 2.500 $\mu\epsilon$, sedangkan regangan ultimit berkisar antara 3.000 – 8.000 $\mu\epsilon$.

Selain itu, Tutluoğlu, Öge dan Karpuz (2015) juga memberikan gambaran terkait kurva hubungan tegangan regangan dibawah beban tekan yang terbagi menjadi beberapa daerah sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Grafik hubungan tegangan regangan

Daerah I kurva berbentuk sedikit cekung ke bagian atas, menunjukkan bahwa celah mulai terbuka, hal ini mengindikasikan sebagai bukti pertama dari sifat nonlinier pada kurva. Daerah II, kurva berada pada daerah elastis, menunjukkan karakteristik dari bagian yang cenderung linier, mengindikasikan bahwa perilaku elastis linier berlaku. Daerah III, kurva sedikit cekung ke bawah, menunjukkan bahwa kurva berada di sekitar tegangan di atas 50% dari tegangan puncak sampai tegangan puncak. Formasi retakan besar terjadi dengan penyebaran yang stabil, dan deformasi permanen yang terjadi tidak menyebabkan benda uji kehilangan daya dukung beban. Titik C, merupakan tegangan maksimum, yang ditandai dengan perambatan tidak stabil dari benda uji dimulai dan mulai membentuk suatu bidang keruntuhan yang besar. Daerah IV, atau daerah pasca tegangan puncak, menunjukkan karakteristik dari perilaku getas, yaitu material kehilangan kemampuan dalam menahan beban seiring dengan meningkatnya deformasi. Namun pada Gambar 2, menunjukkan terjadi *strain-*

softening yaitu penurunan secara bertahap dengan kemiringan terbatas sampai di daerah berikutnya. Daerah V, material mencapai keadaan sisa, deformasi pada retak yang sudah ada berlanjut dibawah pengaruh tegangan aksial yang konstan, dan kecenderungan untuk mencapai kondisi daerah sisa diamati dengan perataan pada kurva.

2.3.3 Modulus elastisitas

Modulus elastisitas merupakan rasio tegangan terhadap regangan di bawah batas proporsional material. Proporsi campuran beton yang digunakan turut mempengaruhi nilai modulus elastisitas yang diperoleh. Menurut Nematzadeh dan Baradaran-Nasiri (2018), menyatakan bahwa nilai modulus elastisitas turut dipengaruhi oleh proporsi campuran, rasio dari agregat kasar dan halus, kualitas material yang digunakan, rasio air dan semen, suhu, serta perawatan beton.

Nilai modulus elastisitas dari beton dapat diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium menggunakan alat compressometer yang dipasang pada benda uji beton silinder. Berdasarkan ASTM C469 (2014) nilai modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,000050} \quad (2)$$

Dengan pengertian:

- E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)
- S_2 = Tegangan pada saat 40% dari beban maksimum beton (MPa)
- S_1 = Tegangan pada saat regangan mencapai $\varepsilon_1 = 0,00005$ (MPa)
- ε_2 = Regangan yang dihasilkan pada saat S_2

Selain itu, nilai modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan rumus empirik yang diberikan dalam SNI 2847 (2019), yaitu sebagai berikut:

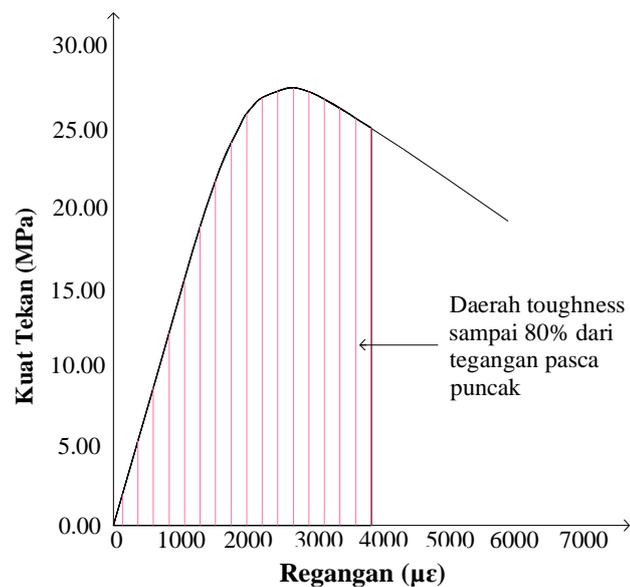
$$E_c = 4700\sqrt{f'c} \quad (3)$$

Dengan pengertian:

- E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)
- $f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

2.3.4 Toughness

Toughness merupakan suatu ukuran kapasitas penyerapan energi suatu material selama pembebanan dan digunakan untuk mengkarakterisasi potensi material untuk menahan fraktur. Nilai toughness benda uji beton dihitung sebagai area yang berada di bawah kurva tegangan-regangan sampai dengan 80% dari tegangan pasca puncak (Meddah, Zitouni dan Belâabes, 2010; Munir *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2022; Irmawaty *et al.*, 2023). Area perhitungan toughness ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Area toughness di bawah kurva tegangan-regangan

2.3.5 Model eksisting hubungan kurva tegangan regangan beton

Untuk mengevaluasi hubungan tegangan regangan, terdapat dua model eksisting yang dapat digunakan pada beton, yaitu model eksisting Popovic dan model eksisting Carreira dan Chu. Menurut Popovics (1973), hubungan tegangan regangan beton dapat diprediksi dengan menggunakan rumus berikut:

$$\sigma = f'c \beta \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) / \left[\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^\beta \right] \quad (4)$$

$$\beta = 1 + 0.058 f'c \quad (5)$$

$$\epsilon_0 = 735 (f'c)^{0.25} \times 10^{-6} \quad (6)$$

Dengan pengertian:

- $f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)
- σ = Tegangan (MPa)
- ε = Regangan (mm/mm)
- ε_0 = Regangan prediksi (mm/mm)

Sedangkan menurut Carreira dan Chu (1985) hubungan tegangan regangan beton dapat diprediksi dengan menggunakan rumus berikut:

$$\sigma = f'c \beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) / \left[\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^\beta \right] \quad (7)$$

$$\beta = 1 / [1 - (f'c / (\varepsilon_0 E_{it}))] \quad (8)$$

$$E_{it} = 0.0736 \rho^{1.51} (f'c)^{0.3} \quad (9)$$

$$\varepsilon_0 = (1680 + 7.1 f'c) \times 10^{-6} \quad (10)$$

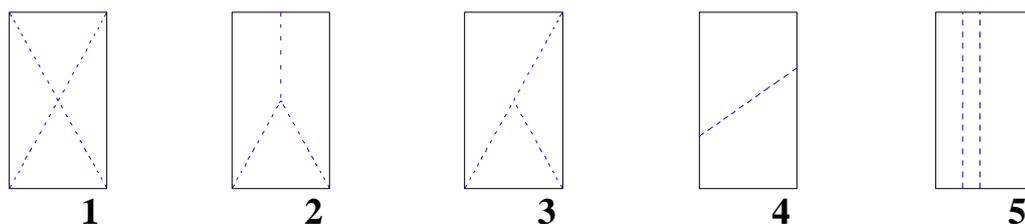
Dengan pengertian:

- $f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)
- σ = Tegangan (MPa)
- ε = Regangan (mm/mm)
- ε_0 = Regangan prediksi (mm/mm)
- ρ = Berat jenis beton (kg/m^3)

Pada penelitian ini, regangan yang digunakan dalam satuan μ atau $\mu strain$. Sehingga pada perhitungan regangan prediksi tidak dikalikan dengan 10^{-6} melainkan menjadi 10^6 .

2.4 Pola Retak Beton

Retak yang terjadi pada struktur beton, dapat diartikan sebagai suatu kondisi dimana terjadi pecah atau pemisahan pada suatu struktur, yang tidak menyebabkan terjadinya sebuah keruntuhan. Retak berdasarkan jenis polanya, menurut SNI 1974 (2011) terdapat lima jenis pola keretakan atau kehancuran pada beton, yaitu kehancuran kerucut, kehancuran kerucut dan belah, kehancuran geser, kehancuran sejajar sumbu tegak atau kolumnar. Kelima jenis pola retak ditampilkan pada Gambar 4.



Dengan keterangan:

- 1 Bentuk kehancuran kerucut
- 2 Bentuk kehancuran kerucut dan belah
- 3 Bentuk kehancuran kerucut dan geser
- 4 Bentuk kehancuran geser
- 5 Bentuk kehancuran sejajar sumbu tegak (kolumnar)

Gambar 4 Pola retak atau kehancuran pada benda uji beton

2.5 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 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.

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 menggunakan tiga variasi campuran, yaitu variasi pertama adalah beton konvensional 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 konvensional. Penurunan nilai UPV, penyerapan air, modulus elastisitas dinamis beton, dan porositas yang dibuat menggunakan variasi 20% RBA kasar dan halus lebih tinggi dibandingkan beton yang dibuat menggunakan variasi 20% RBA kasar. Akan tetapi, penggantian 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.

Khatab, 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 konvensional yang terbuat dari 100% NCA. Penelitian ini menggunakan 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.

Mohammed 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 menggunakan 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 menggunakan 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.

Khattab *et al.* (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 menggunakan dua parameter, yaitu persentase penggantian 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 penggantian RBA terhadap agregat kasar alami menyebabkan penurunan kinerja beton. Akan tetapi, beton dapat diproduksi dengan menggunakan substitusi RBA sampai 30% untuk mencapai properti yang berkualitas baik dan dapat diterima.

Khattab dan Hachemi (2020) 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 dan Baradaran-Nasiri (2018) 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 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 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.