

**PERILAKU KUAT TEKAN DAN INDIKATOR SUSTAINABILITAS BETON
YANG MENGGUNAKAN AGREGAT DAUR ULANG LIMBAH BATU
BATA TAHAN API ALUMINA**

*Compressive Strength Behavior and Sustainability Indicators of Concrete Using Recycled
Aggregate of Alumina Refractory Brick Waste*



NURUL HIKMAH AULIYA

D012231012



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

TESIS**PERILAKU KUAT TEKAN DAN INDIKATOR SUSTAINABILITAS
BETON YANG MENGGUNAKAN AGREGAT DAUR ULANG LIMBAH
BATU BATA TAHAN API ALUMINA****NURUL HIKMAH AULIYA****D012231012**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 26 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,**Pembimbing Utama**

Dr. Ir. M. Asad Abdurrahman, ST., M. Eng.PM.IPM
NIP.19730306 199802 1001

Pembimbing Pendamping

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

**Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin**

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., AER
NIP. 19730926 200012 1002

**Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil**

Dr. Ir. M. Asad Abdurrahman, ST., M. Eng.PM.IPM
NIP.19730306 199802 1001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertandatangan dibawah ini

Nama : Nurul Hikmah Auliya

Nomor Induk Mahasiswa : D012231012

Program Studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Perilaku Kuat Tekan dan Indikator Sustainabilitas Beton yang Menggunakan Agregat Daur Ulang Limbah Batu Bata Tahan Api Alumina” adalah benar Karya saya dengan Arahan dari Komisi Pembimbing Dr. Ir. M. Asad Abdurrahman, ST., M.Eng, PM, IPM dan Dr.Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun 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 Asian Journal Of Civil Engineering dengan status under review sebagai artikel dengan judul (*“Influence of Refractory Brick Roof Waste as Natural Aggregate Alternative on Tensile Strength of Concrete and Environmental Impact”*)

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

Gowa, 29 November 2024

Yang menyatakan,



Nurul Hikmah Auliya

KATA PENGANTAR

Dengan penuh kerendahan hati penulis panjatkan puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan susunan proposal Tesis ini yang merupakan salah satu persyaratan akademik guna menyelesaikan studi magistes pada Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Dalam tulisan ini penulis menyajikan pokok bahasan menyangkut masalah dibidang transportasi, dengan judul: **“PERILAKU KUAT TEKAN DAN INDIKATOR SUSTAINABILITAS BETON YANG MENGGUNAKAN AGREGAT DAUR ULANG LIMBAH BATU BATA TAHAN API ALUMINA”** 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. Dr. Ir. M. Asad Abdurrahman, ST., M.Eng. PM, IPM selaku Ketua Program Studi 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.Ir.H.M. Wihardi Tjaronge, ST., M. Eng, Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST., MT., IPU, selaku penguji.
6. Serta seluruh dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Teman-teman Eco-Material 20231 yang selalu menemani dalam penyelesaian penulisan tesis ini.

8. Orang Tua Tercinta Sainuddin dan Andi Suridah yang selalu memberi motivasi dan bantuan baik moral maupun materi serta adik tercinta.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada orang tua saya tercinta, khususnya ayah saya, Ir. Sainuddin, MT, dan ibu saya, Hj. Andi Suridah, atas doa, kasih sayang, dan dukungan yang telah diberikan selama ini, baik secara spiritual maupun material. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada seluruh keluarga besar atas dorongan dan nasehat yang telah diberikan.
2. Saudara tercinta Mitahul Khaer, dan sepupu-sepupu tersayang Fira dan Uci yang selalu memberikan semangat dalam penyelesaian tesis ini.
3. Sahabat saya Sitti, Ica, Nui, Ari, Dela, dan Gomes yang selalu menemani dalam suka duka hingga ada di titik ini.
4. Seluruh rekan di Laboratorium Riset Eco Material terutama untuk saudari Kak lin, Jenry, Ummul, Deti, Viranty, Komang, Inul, Kak Azwar, Kak Gerry, Hasniar, Zair, Kak Erwin, Hamdar, dan Adik-adik S1, yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tesis ini.

Penulis mengakui bahwa semua ciptaan manusia pada dasarnya memiliki kekurangan; oleh karena itu, saya berharap para pembaca dapat memberikan masukan untuk meningkatkan kualitas dan orisinalitas tesis ini.

Sebagai penutup, semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karuniaNya kepada kita semua dan semoga tesis ini terbukti sangat bermanfaat, khususnya di bidang Teknik Sipil.

Gowa, 25 November 2024

Penyusun

Nurul Hikmah Auliya

ABSTRAK

NURUL HIKMAH AULIYA. *Perilaku Kuat Tekan dan Indikator Sustainability Beton yang Menggunakan Agregat Daur Ulang Limbah Batu Bata Tahan Api Alumina* (dibimbing oleh **Muhammad Asad Abdurrahman dan Muhammad Akbar Caronge**)

Penelitian ini menegaskan perlunya eksplorasi opsi yang ramah lingkungan dalam sektor konstruksi, terutama dalam mengolah sisa-sisa batu bata tahan api agar dapat dijadikan bahan baku untuk beton yang lebih berkelanjutan. Pemanfaatan Limbah daur ulang Refractory Brick Furnace Roof Aggregate (RBF) sebagai pengganti Coarse Aggregate (CA) dalam beton adalah langkah inovatif yang menunjukkan potensi besar dalam mengurangi dampak lingkungan sambil memenuhi kebutuhan akan material granular. Variasi dalam persentase penggunaan RBF yang digunakan sebesar 15%, 30%, dan 50% memberikan pemahaman yang mendalam tentang dampak proporsi RBF terhadap karakteristik beton yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan RBF dalam campuran beton tidak hanya meningkatkan kelayakan proses konstruksi beton, tetapi juga memberikan efek positif pada kekuatan tekan, dan indikator sustainability lingkungan. Pada indikator sustainability lingkungan, parameter yang dilakukan pada penelitian ini adalah GWP, AP, EP, dan POCP. Dengan demikian, penelitian ini memberikan sumbangan penting terhadap pengembangan beton ramah lingkungan yang berkualitas, yang tidak hanya memenuhi persyaratan teknis konstruksi tetapi juga mempertimbangkan aspek perlindungan lingkungan. Implementasi temuan ini berpotensi mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas sambil mengurangi volume limbah yang dibuang ke lingkungan.

Kata kunci: Agregat Tungku Bata Tahan Api (RBF), kuat tekan, dampak lingkungan, indikator sustainability lingkungan, strength index parameter

ABSTRACT

NURUL HIKMAH AULIYA. *Compressive Strength Behavior and Sustainability Indicators of Concrete Using Recycled Aggregate of Alumina Refractory Brick Waste* (supervised by **Muhammad Asad Abdurrahman dan Muhammad Akbar Caronge**)

This study emphasizes the need to explore environmentally friendly options in the construction sector, especially in processing refractory brick waste to be used as raw material for more sustainable concrete. The use of recycled Refractory Brick Furnace (RBF) waste as a substitute for Coarse Aggregate (CA) in concrete is an innovative step that shows great potential for reducing environmental impacts while meeting the need for granular materials. Variations in the percentage of RBF used by 15%, 30%, and 50% provide a deep understanding of the impact of the proportion of RBF on the characteristics of the resulting concrete. The results show that the application of RBF in the concrete mixture not only improves the feasibility of the concrete construction process, but also has a positive effect on compressive strength, and environmental sustainability indicators. In the environmental sustainability indicator, the parameters used in this study are GWP, AP, EP, and POCP. Thus, this study provides an important contribution to the development of quality, environmentally friendly concrete, that not only meets the technical requirements of construction but also considers environmental protection aspects. The implementation of these findings has the potential to reduce dependence on limited natural resources while reducing the volume of waste discharged into the environment.

Keywords: Refractory Brick Furnace (RBF), compressive strength, environmental impact, environmental sustainability indicator, strength index parameter

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR NOTASI	xii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
BAB II	18
METODE PENELITIAN	18
2.1 Metode Penelitian	18
2.2 Tempat dan Waktu Penelitian	19
2.3 Jenis dan Sumber Penelitian	19
2.4 Alat dan Bahan Penelitian	20
2.5 Pemeriksaan Karakteristik Material	21
2.6 Rancangan Campuran Beton (Mix Design)	21
2.7 Pembuatan Benda Uji	22
2.8 Pemeriksaan Slump Test pada Beton	24
2.9 Perawatan Benda Uji	25
2.10 Pengujian Benda Uji	25
2.11 Indikator Sustainability Lingkungan	27
BAB III	30
HASIL DAN PEMBAHASAN	30
3.1 Karakteristik Material	30
3.2 Hasil Uji Slump	31

3.3	Kuat Tekan Beton.....	32
3.4	Hasil Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)	34
3.5	Hubungan Antara Tegangan dan Regangan	35
3.6	Nilai Toughness Beton.....	37
3.7	Modulus Elastisitas.....	38
3.8	Indikator Sustainability Lingkungan.....	39
BAB IV		46
KESIMPULAN DAN SARAN.....		46
4.1.	Kesimpulan.....	46
4.2.	Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA.....		47
LAMPIRAN		52

DAFTAR TABEL

Tabel 1	7
Tabel 2	8
Tabel 3	21
Tabel 4	22
Tabel 5	23
Tabel 6	28
Tabel 7	30
Tabel 8	30
Tabel 9	30
Tabel 10	39
Tabel 11	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Kurva hubungan tegangan regangan tipikal beton	9
Gambar 2 Grafik hubungan tegangan regangan.....	10
Gambar 3 Area <i>toughness</i> di bawah kurva tegangan-regangan.....	12
Gambar 4 Desain Konseptual	17
Gambar 5 Diagram Alir Penelitian	18
Gambar 6	20
<i>Refractory Brick Furnace Roof tipe Alumina</i>	20
Gambar 7	20
Pasir	20
Gambar 8	21
Semen Portland Komposit (PCC)	21
Gambar 9	21
Air	21
Gambar 10 Proses pembuatan benda uji beton.....	24
Gambar 11 Pemeriksaan uji slump beton.....	25
Gambar 12 Perawatan (curing) benda uji beton	25
Gambar 13 Pengujian kuat tekan	26
Gambar 14 Pengujian modulus elastisitas.....	26
Gambar 15 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>	27
Gambar 17 Hasil pengujian slump beton segar dari campuran beton dengan variasi campuran RBF yang berbeda.....	32
Gambar 18 Nilai puncak rata-rata Kuat Tekan untuk mutu beton 20 MPa	34
Gambar 19 Nilai puncak rata-rata Kuat Tekan untuk mutu beton 24 MPa	34
Gambar 20 Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> untuk perendaman 7 hari.....	35
Gambar 22 Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> untuk perendaman 28 hari.....	35
Gambar 22 Hubungan Tegangan dan Regangan pada mutu $f'c$ 20 MPa setelah perendaman 7 dan 28 hari.....	37
Gambar 23 Hubungan Tegangan dan Regangan pada mutu $f'c$ 24 MPa setelah perendaman 7 dan 28 hari.....	37
Gambar 24 Nilai <i>toughness</i> pada setiap variasi campuran beton.....	38
Gambar 25 Nilai modulus elastisitas eksperimental pada setiap campuran beton.....	39
Gambar 26 Hubungan antara GWP dan SI_{GWP-CS}	41
Gambar 27 Hubungan antara AP dan SI_{AP-CS}	43
Gambar 28 Hubungan antara EP dan SI_{EP-CS}	44
Gambar 29 Hubungan antara POCP dan $SI_{POCP-CS}$	45

DAFTAR NOTASI

Lambang / Singkatan	Arti dan Keterangan
f'_c	= Kuat tekan beton (MPa)
P	= Gaya Tekan Maksimum (N)
A	= Luas Penampang Benda Uji (mm^2)
V	= Ultrasonic Pulse Velocity (m/s)
L	= Jarak antara pusat permukaan transduser (m)
T	= Waktu Tempuh (s)
RBF	= Refractory Brick Roof
CS	= Kuat Tekan (MPa)
NWC	= Normal Weight Concrete
IS_{i-CS}	= Indikator Sustainability
Total _{mix}	= total dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix design yang digunakan
PCC	= Portland Composite Cement
ε	= Regangan
E_c	= Modulus Elastisitas (MPa)
S_1	= Tegangan pada saat regangan mencapai ε_1 0,00005 (MPa)
S_2	= Tegangan pada saat regangan mencapai ε_1 0,00005 (MPa)
IS_{GWP-CS}	= GWP_{mix} total nilai yang diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgCO ₂)
GWP_{mi}	GWP diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan (kgCO ₂)
$IS_{POCP-CS}$	= $POCP_{mix}$ total nilai yang diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSb)
$POCP_{mix}$	= $POCP$ diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan (kgSb)
IS_{AP-CS}	= AP_{mix} total nilai yang diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSO ₂)
AP_{mix}	= AP diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan (kgSO ₂)
IS_{EP-CS}	EP_{mix} total nilai yang diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgPO ₄)
EP_{mix}	EP diperoleh dari <i>mix design</i> yang digunakan (kgPO ₄)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya permintaan akan material granular, sebagai respons terhadap persyaratan perlindungan lingkungan, memerlukan pencarian solusi yang konsisten dengan visi pembangunan berkelanjutan. Oleh karena itu, perlu dicari dan dijajaki segala kemungkinan dan peluang untuk menggunakan kembali dan mendaur ulang sebagian limbah industri produk bangunan. Beton selalu menjadi bahan konstruksi yang paling umum digunakan dan merupakan salah satu bahan yang mampu memanfaatkan banyak limbah dengan komposisi berbeda seperti penambahan mineral atau butiran. Permintaan agregat alami, seperti pasir atau kerikil alami, terus meningkat pesat, menyebabkan peningkatan biaya transportasi dan terbatasnya perlindungan lingkungan. Sehingga, produksi beton dengan agregat daur ulang menjadi menarik karena dapat memenuhi kebutuhan sumber agregat lain dan mengurangi volume limbah. Penggunaan agregat daur ulang dalam beton memiliki banyak manfaat baik bagi lingkungan manusia dan perekonomian, serta semakin pentingnya teknologi di sektor industri.

PT Vale Indonesia Tbk, produsen nikel Indonesia, memproduksi produk setengah jadi matte dari bijih laterit di fasilitas penambangan dan pemrosesan terintegrasi di dekat Sorowako, pulau Sulawesi. Saat ini PT. Vale Indonesia memproduksi sekitar 4.500ton atau 150meter kubik dinding tungku per tahun yang tergolong limbah. Oleh karena itu, pembuangan limbah batu bata tahan api akan berdampak pada lingkungan sekitar tambang. Penggunaan batu bata tahan api sebagai agregat, jika digunakan secara luas, akan memberikan dampak ekonomi yang sangat besar terhadap dunia usaha, pemerintah, dan masyarakat sekitar.

Refaktori memiliki peran penting dalam berbagai proses yang melibatkan suhu tinggi, seperti produksi logam, semen, kaca, dan keramik, karena material padat ini mampu bertahan dalam suhu tinggi sambil mempertahankan fungsi mekanisnya dalam jangka panjang di berbagai kondisi, bahkan saat terpapar cairan atau gas korosif. Batu bata tahan api adalah jenis batu bata dengan komposisi kimia berbeda dari batu bata tradisional, yang memengaruhi struktur, ketahanan, atau konduktivitas termal ketika terkena panas, serta memiliki efisiensi energi. Batu bata ini banyak digunakan untuk pelapis perapian, cerobong asap, tungku baja, dan oven industri. Diperkirakan sekitar 28 juta ton limbah refaktori dihasilkan setiap tahun. Setelah masa pakai habis, batu bata ini dibuang dan menjadi limbah. Hampir 99% dari refaktori tersebut dibuang ke tanah, yang berdampak negatif terhadap keanekaragaman hayati yang berharga. Batu bata tahan api ini kini juga digunakan sebagai agregat ramah lingkungan jenis baru, menggantikan agregat alami. Namun, pemanfaatan batu bata tahan api sebagai agregat kasar dalam pembuatan beton yang tahan lama masih kurang diperhatikan.

Ada banyak penelitian tentang bahan pengganti bahan baku beton dengan memanfaatkan limbah industri dan bahan daur ulang. *Fly ash* merupakan salah satu limbah industri pembangkit listrik yang digunakan sebagai pengganti semen pada campuran beton (E Bachtiar, 2018). Selain abu layang, abu sekam padi dapat menggantikan sebagian semen sebagai bahan pengikat pada beton (Ahmad, Parung, Tjaronge, & Djamaluddin, 2014). (Nematzadeh & 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. (M. Khattab, Hachemi, & Al Ajlouni, 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 (M. Khattab et al., 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. (Hchemi, Khattab, & 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, Mitterpach, Safi, Amrane, & Saidi, 2017) memperoleh bahwa limbah batu bata tahan api berpotensi digunakan sebagai bahan semen atau tambahan dalam produksi beton.

Secara global, material konstruksi yang paling banyak digunakan setelah air adalah beton semen portland (Gartner, 2012) yang menyumbang sekitar 5% emisi CO₂ antropogenik dan 12-15% penggunaan energi dari sektor industri (Thwe, Khatiwada, & Gasparatos, 2021). Elemen lingkungan yang juga dipertimbangkan dalam termasuk pada potensi penipisan abiotik, potensi pengasaman serta potensi eutrofikasi yang sangat mempengaruhi lingkungan. Tingginya potensi risiko lingkungan yang terjadi dalam proses produksi semen menunjukkan adanya potensi yang signifikan untuk perbaikan pada dampak lingkungan. India adalah produsen batu bata terbesar kedua di dunia, dengan menilai produksi tahunan sebesar 250 miliar batu bata yang diproduksi oleh 1,44 lakh tempat pembakaran batu bata dan tenaga kerja sekitar 15 juta orang. Karena industri konstruksi menghasilkan dampak lingkungan yang tidak menyenangkan dan merupakan salah satu sektor industri yang paling tidak berkelanjutan, hal ini juga disebabkan oleh berbagai alasan seperti konsumsi energi yang besar, penggunaan bahan mentah yang tidak dapat diperbarui secara sembarangan, dan aktivitasnya menyebabkan emisi dan polusi lingkungan (Sandanayake, Zhang, & Setunge, 2018). Kontribusi terbesar untuk mencapai konstruksi berkelanjutan adalah dengan mengurangi dampak lingkungan secara

keseluruhan, perubahan besar yang dialami bumi akibat aktivitas industri dan manusia (Rice & Vosloo, 2014). Persiapan batu bata memerlukan penghilangan tanah produktif teratas pertanian, yaitu tanah yang kaya akan tanah liat dan humus. Tempat pembakaran batu bata telah menghabiskan tanah produktif selama bertahun-tahun, sejak Peradaban Lembah Indus, dan sangat merusak jasa ekosistem tanah. Dataran Gangga, yang meliputi negara bagian dari Assam, Haryana, Punjab, Uttar Pradesh, Bihar dan Benggala Barat, menyumbang hingga 65 % dari total produksi batu bata (Nath, Lal, & Das, 2018). Berdasarkan catatan, limbah konstruksi dan pembongkaran yang dihasilkan di India adalah 117 hingga 120 juta ton/tahun (Ramanathan & Ram, 2020). Limbah batu bata menyumbang 32% dari CDW yang dihasilkan di India, yang mana jumlah ini relatif lebih tinggi. (Sabău, Bompă, & Silva, 2021) menyatakan bahwa beberapa laporan Life Cycle Assessment (LCA) menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap jarak yang ditempuh untuk pengangkutan material dari sumbernya ke unit produksi beton dalam hal Analisis Dampak Lingkungan (EI) atau CO₂. Parameter ini dapat digunakan sebagai metode penilaian untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari beton (Vembu & Ammasi, 2024). Oleh karena itu, penulis memilih untuk menggali potensi penggunaan limbah batu bata tahan api, khususnya tipe alumina roof, sebagai agregat kasar dalam campuran beton.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji sejauh mana limbah batu bata tahan api dapat berfungsi sebagai pengganti agregat kasar dalam campuran beton, dengan fokus pada dampaknya terhadap lingkungan. Pemilihan limbah batu bata tahan api sebagai agregat kasar mencerminkan komitmen penulis untuk memberikan kontribusi berarti dalam literatur penelitian, serta memperkaya pemahaman mengenai pemanfaatan limbah tersebut dalam industri konstruksi, khususnya terkait kinerja lingkungan dalam pengembangan formulasi beton yang berkelanjutan.

Adapun judul yang diangkat oleh penulis adalah **“Perilaku Kuat Tekan dan Indikator Sustainability Beton yang Menggunakan Agregat Daur Ulang Limbah Batu Bata Tahan Api Alumina”**

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan yang ingin diselesaikan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Permasalahan mengenai perilaku kuat tekan beton yang menggunakan limbah batu bata tahan api tipe alumina daur ulang sebagai alternatif agregat kasar.
2. Permasalahan mengenai pengaruh penggunaan limbah batu bata tahan api tipe alumina daur ulang sebagai alternatif agregat kasar terhadap indikator keberlanjutan lingkungan.

1.1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisa perilaku kuat tekan beton yang menggunakan daur ulang limbah batu bata tahan api tipe alumina sebagai alternatif agregat kasar
2. Menganalisa pengaruh daur ulang limbah batu bata tahan api tipe alumina sebagai alternatif agregat kasar terhadap indikator sustainabilitas lingkungan

1.1.3 Manfaat Penelitian

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat mengembangkan wawasan mengenai kinerja beton dari limbah batu bata tahan api tipe alumina alternatif agregat kasar. Sehingga, mengetahui pemanfaatan dan penggunaan limbah batu bata tahan api tipe alumina sebagai langkah untuk mengurangi limbah pabrik dengan melakukan daur ulang. Sehingga dapat menghasilkan beton yang ekonomis dan ramah lingkungan.

1.1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penulisan ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan limbah batu bata tahan api tipe alumina daur ulang sebagai alternatif agregat kasar, yang berasal dari PT. Vale Indonesia.
2. Proses daur ulang agregat limbah batu bata tahan api tipe alumina dilakukan secara manual dengan metode penghancuran.
3. Acuan yang digunakan adalah SNI 03-0691-1996 dan jurnal-jurnal ilmiah terdahulu.
4. Jenis semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen portland komposit (PCC) yang memenuhi standar SNI-2049-2015.
5. Persentase penggunaan limbah batu bata tahan api tipe alumina daur ulang dari atap tungku adalah 0%, 15%, 30%, dan 50% dari total volume agregat kasar dalam campuran beton.
6. Kualitas beton ditargetkan dengan kuat tekan rencana (f'_c) sebesar 20 MPa dan 24 MPa.
7. Bentuk benda uji berupa silinder berukuran 20 x 10 x 6 cm yang diuji pada umur 7 hari dan 28 hari.

1.2 Teori

1.2.1 Beton

Menurut (SNI 2847, 2019), beton merupakan campuran agregat halus, agregat kasar, air, semen portland atau jenis semen hidrolis lainnya, dengan atau tanpa bahan tambahan (admixture). Seiring bertambahnya umur beton, material ini akan terus mengeras dan umumnya mencapai kekuatan rencana dalam sekitar 28 hari. Komposisi campuran beton sangat memengaruhi kekuatan beton yang dihasilkan. Menurut (Nawy, 1990), 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 50 °F;
8. Kandungan klorida tidak lebih dari 0.15% pada beton ekspos dan 1% pada beton terlindung.

1.2.2 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.

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) 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; Mansyur, Tjaronge, Irmawaty, & Amiruddin, 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.

3) Air

Air adalah salah satu komponen penting dalam beton, yang berperan sebagai pemicu reaksi kimia pada semen dalam campuran beton. Reaksi kimia antara semen dan air menghasilkan proses pengikatan dan pengerasan pada beton setelah jangka waktu tertentu. Air juga membantu dalam mencampur bahan penyusun beton lainnya serta digunakan untuk perawatan (*curing*) beton. Jumlah air dalam campuran beton sangat mempengaruhi kemudahan pekerjaan beton dan kekuatannya; proporsi air yang tepat akan menghasilkan kekuatan beton yang optimal, sedangkan kelebihan air dapat menyebabkan penurunan kekuatan beton.

Menurut (SNI 2847, 2019), kelebihan air dalam proses pencampuran dapat memengaruhi durasi pengerjaan, kekuatan beton, stabilitas volume, serta berpotensi mengubah warna beton. Air yang digunakan harus berkualitas baik dan tidak boleh mengandung ion klorida dalam kadar yang merusak, atau zat berbahaya lainnya seperti asam, minyak, garam, dan bahan merugikan lainnya.

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, 2017), agregat halus memiliki modulus kehalusan butir pada rentang 2.3 – 3.1.

Menurut (SNI 03-2834, 2000b), 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

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)(Badan Standarisasi Nasional 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

6) Batu bata tahan api atau refractory brick

Batu bata tahan api atau *refractory brick* adalah material padat yang mampu bertahan pada suhu tinggi dan menjaga kekuatan mekanisnya dalam jangka waktu tertentu di berbagai kondisi, bahkan saat bersentuhan dengan cairan atau gas korosif. Batu bata tahan api sangat dibutuhkan dalam berbagai kegiatan yang memerlukan ketahanan suhu tinggi, seperti pada proses produksi logam, semen, kaca, dan keramik (Horckmans, Nielsen, Dierckx, & Ducastel, 2019). Batu bata tahan api termasuk dalam kategori bahan keramik yang mampu mempertahankan bentuk dan kekuatannya di bawah kondisi suhu tinggi, cairan korosif, zat kimia lainnya, gas panas, serta tahan terhadap abrasi dan tegangan mekanik akibat panas (Kavas, Karasu, & Arslan, 2006).

Terdapat berbagai jenis refraktori yang disesuaikan dengan kebutuhan suhu dan proses untuk setiap aplikasi. Refraktori digunakan dalam berbagai bentuk, namun umumnya diklasifikasikan berdasarkan jenis ikatan, komposisi kimia (asam, basa, atau netral), dan metode pemasangan (berbentuk, dengan suhu pembakaran hingga 1500°C, atau tidak berbentuk). Berdasarkan interaksi bahan baku dengan air, refraktori dapat dikelompokkan menjadi asam, basa, atau netral. Refraktori asam, seperti alumina-silikat, silika, dan zircon, umumnya digunakan pada suhu operasi yang lebih rendah daripada refraktori lainnya dan cenderung lebih ekonomis dalam produksinya. Refraktori netral, seperti alumina dan kromia, banyak digunakan dalam industri logam karena memiliki titik leleh tinggi, harga yang terjangkau, dan ketersediaan yang baik. Selain itu, refraktori alumina lebih mudah ditemukan dibandingkan refraktori kromia, yang berdampak negatif terhadap lingkungan (Fang, Smith, & Peaslee, 1999). Refraktori bauksit, yang memiliki kandungan alumina tinggi, sering digunakan dalam industri baja, seperti pada tungku busur listrik, dan juga dalam industri semen dan kapur sebagai pelapis tanur putar (Horckmans et al., 2019).

1.2.3 Sifat Mekanis Beton

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, 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:

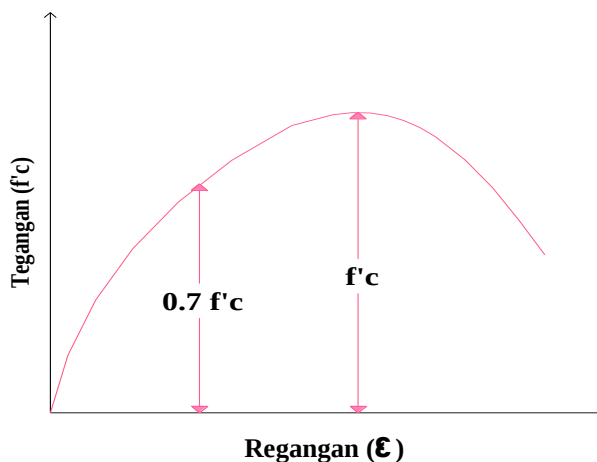
$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

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) Hubungan tegangan regangan beton

Hubungan antara tegangan dan regangan pada beton penting untuk dipahami dalam rangka merumuskan persamaan-persamaan yang diperlukan dalam analisis dan desain struktur beton. Gambar 1 menunjukkan kurva tegangan-regangan khas beton di bawah pembebanan tekan uniaksial selama beberapa menit. Menurut Nawy (1998), tahap awal kurva ini, hingga sekitar 40% dari tegangan puncak, dapat dianggap linier. Ketika mencapai sekitar 70% dari tegangan puncak, terjadi penurunan kekakuan material yang ditandai dengan ketidaklinieran pada kurva. Pada beban maksimum, retakan searah dengan arah pembebanan mulai muncul, sehingga menjadi jelas terlihat, dan umumnya semua benda uji beton (kecuali yang memiliki kekuatan rendah) akan cepat hancur.

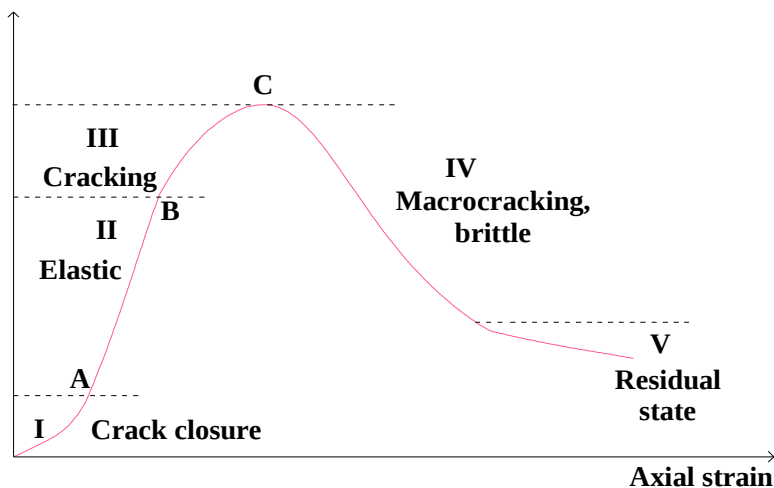


Gambar 1 Kurva hubungan tegangan regangan tipikal beton

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 & 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 pada kurva berbentuk sedikit cekung ke arah atas, menunjukkan bahwa celah mulai terbuka, yang mengindikasikan adanya bukti pertama dari sifat nonlinier pada kurva tersebut. Pada Daerah II, kurva berada dalam zona elastis, menampilkan karakteristik yang cenderung linier, yang mengindikasikan bahwa perilaku elastis linier berlaku. Di Daerah III, kurva sedikit cekung ke bawah, menunjukkan bahwa kurva berada di sekitar tegangan lebih dari 50% dari tegangan puncak hingga mencapai tegangan puncak. Pada fase ini, pembentukan retakan besar terjadi dengan penyebaran yang stabil, dan deformasi permanen yang terjadi tidak mengakibatkan benda uji kehilangan kapasitas dukung beban. Titik C merupakan tegangan maksimum, yang ditandai dengan mulai terjadinya perambatan yang tidak stabil dari benda uji dan pembentukan suatu bidang keruntuhan yang

besar. Daerah IV, atau daerah pascapuncak, menunjukkan karakteristik perilaku getas, di mana material kehilangan kemampuannya untuk menahan beban seiring dengan meningkatnya deformasi. Namun, pada Gambar 2, terlihat terjadi *strain-softening*, yaitu penurunan secara bertahap dengan kemiringan terbatas hingga mencapai daerah berikutnya. Pada Daerah V, material mencapai kondisi sisa, di mana deformasi pada retakan yang sudah ada berlanjut di bawah pengaruh tegangan aksial yang konstan, dan kecenderungan untuk mencapai kondisi daerah sisa dapat diamati melalui perataan pada kurva.

3) Modulus elastisitas

Modulus elastisitas adalah rasio antara tegangan dan regangan pada batas proporsional suatu material. Komposisi campuran beton yang digunakan mempengaruhi besarnya nilai modulus elastisitas yang diperoleh. Menurut (Nematzadeh & Baradaran-Nasiri, 2018), nilai modulus elastisitas juga dipengaruhi oleh proporsi campuran, rasio antara agregat kasar dan halus, kualitas material yang digunakan, rasio air terhadap semen, suhu, serta proses perawatan beton.

Nilai modulus elastisitas beton dapat ditentukan melalui 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:

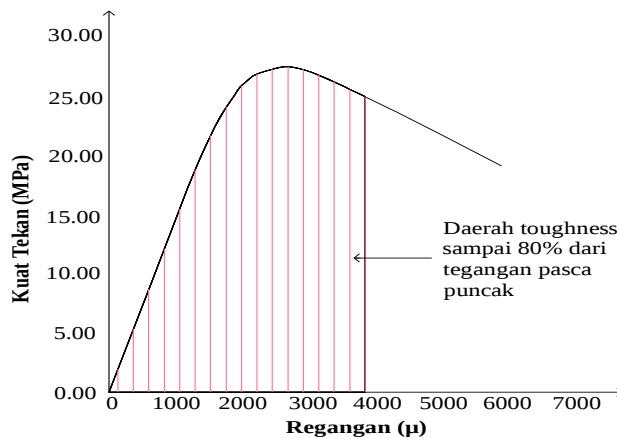
$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,000050} \quad (2)$$

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

4) Toughness

Toughness adalah ukuran kapasitas material dalam menyerap energi selama pembebanan dan digunakan untuk mengkarakterisasi potensi material dalam menahan keretakan. Nilai *toughness* pada benda uji beton dihitung sebagai luas area di bawah kurva tegangan-regangan hingga mencapai 80% dari tegangan pascapuncak (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

5) Indikator Sustainability Lingkungan

Indikator keberlanjutan lingkungan digunakan untuk menyelidiki manfaat lingkungan dari pemanfaatan limbah batu bata tahan api daur ulang sebagai alternatif pengganti agregat kasar dalam campuran beton yang digunakan untuk kerangka struktural bangunan dan infrastruktur. Fokus penelitian ini adalah pada potensi pemanasan global yang diukur dalam kg CO₂ ekuivalen. Dalam skenario di mana persentase agregat dalam campuran beton untuk silinder beton baru menggunakan agregat daur ulang dari limbah batu bata tahan api, agregat tersebut berasal dari bangunan yang sudah ada.

Parameter yang dilakukan pada kinerja lingkungan di penelitian ini adalah GWP (*Global Warming Potential*), AP (*Acidification Potential*), EP (*Eutrophication Potential*), dan POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*). GWP memiliki keterkaitan dengan seluruh gas rumah kaca, yang berasal dari emisi CO₂ dan metana, dapat memicu peningkatan suhu global dan dampak negatif pada ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material. Perubahan iklim merujuk pada fluktuasi suhu global sebagai hasil dari efek rumah kaca. "Gas rumah kaca" seperti karbon dioksida (CO₂), yang dilepaskan oleh aktivitas manusia, tetap berada di atmosfer bumi dan menghalangi kehilangan panas bumi yang diperoleh dari matahari. Peningkatan suhu global ini berpotensi menimbulkan gangguan iklim, desertifikasi, peningkatan permukaan laut, dan penyebaran penyakit. Kesepakatan ilmiah yang substansial menunjukkan bahwa peningkatan emisi gas rumah kaca memiliki dampak yang signifikan terhadap iklim. Dampak AP ini disebabkan oleh deposisi polutan yang bersifat asam pada tanah, air, organisme, ekosistem, dan bahan seperti sulfur dan nitrogen. Gas-gas asam seperti sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NOx) yang dilepaskan dalam pembakaran bahan bakar bereaksi dengan air di tanah atau di atmosfer (di mana ini membentuk "hujan asam"). Asam adalah zat kimia yang dapat menghasilkan ion hidrogen (H⁺, juga disebut 'proton') ketika bertemu air. Ion

hidrogen sangat reaktif dan memicu zat lain mengubah komposisi dan sifat fisiknya. Deposisi asam oleh karena itu dapat merusak ekosistem dan mengikis bahan 23 Kategori EP ini mencakup semua dampak dari tingkat lingkungan yang tinggi dari makronutrien (fosfor dan nitrogen) yang memicu produksi biomassa tinggi di ekosistem akuatik dan darat. Contohnya, polutan udara, air limbah, dll. Nitrat dan fosfat penting untuk kehidupan, tetapi peningkatan konsentrasi mereka dalam air memicu eutrofikasi (over-nutrifikasi) yang dapat mendorong pertumbuhan alga berlebihan, mengurangi oksigen dalam air, dan merusak ekosistem. Kategori POCP mengacu pada reaksi polutan antropogenik di udara dengan sinar matahari yang menghasilkan produk kimia seperti ozon (O_3), menyebabkan peningkatan permukaan tanah tingkat konsentrasi ozon. Hal ini menyebabkan kabut asap yang mengandung senyawa kimia berdampak buruk ekosistem dan berbahaya bagi kesehatan manusia dan pertumbuhan tanaman.

Beberapa penelitian yang memperhatikan secara simultan kuat tekan dan emisi CO_2 oleh (Vembu & Ammasi, 2024). Penelitian ini menyediakan beberapa faktor simultan yang mencakup kuat lentur dengan parameter lingkungan (GWP, ADP, AP, dan EP) seperti pada persamaan berikut

$$IS_{i-Cs} = \frac{C_s}{Total\ i_{mix}} \quad (3)$$

Dimana:

- IS_{i-Cs} = nilai total dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix design yang digunakan dibagi kuat tekan
- $Total\ i_{mix}$ = total dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix design yang digunakan
- C_s = kuat tekan (MPa)

1.3 Penelitian Terdahulu

Pada bagian ini akan dipaparkan hasil-hasil penelitian sebelumnya yang dapat dijadikan acuan dalam menyelesaikan topik penelitian ini. Penelitian-penelitian tersebut telah dipilih sesuai dengan permasalahan yang dihadapi, sehingga diharapkan dapat menjelaskan serta memberikan referensi bagi penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Berikut ini dijelaskan beberapa penelitian terdahulu yang telah dipilih.

Ghosh dan Samanta (2023) melakukan studi eksperimental terkait pemanfaatan limbah batu bata tahan api (RFB) sebagai agregat halus (FA). Delapan campuran beton dengan persentase penggunaan FA dari RFB 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 penelitian eksperimental tentang penggunaan limbah batu bata tahan api atau pembakaran batu bata refractory (RBF), serta rasio air/semen (w/c) terhadap sifat fisik dan mekanik beton. Tiga pilihan campuran berbeda digunakan dalam penelitian. Yang pertama adalah beton konvensional yang terbuat sepenuhnya dari agregat alami (NA), juga dikenal sebagai agregat alami (NA). Yang kedua adalah beton yang dibuat dengan mengganti 20% NA kasar menjadi RBA kasar, dan yang ketiga adalah beton yang dibuat dengan mengganti 20% NA kasar dan halus menjadi RBA kasar dan halus. Ada tiga rasio air/semen (jika digunakan)—0.59, 0.47, dan 0.38. Kuat tekan, modulus elastisitas dinamis, porositas air, densitas, penyerapan air, dan kecepatan ultrasonic pulse (UPV) adalah semua pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketika RBA digunakan dalam campuran beton, kinerjanya sedikit lebih rendah daripada beton konvensional. Beton yang dibuat dengan variasi 20% RBF kasar dan halus memiliki nilai UPV yang lebih rendah, penyerapan air, modulus elastisitas dinamis, dan porositas yang lebih tinggi. Namun, penggantian dengan variasi 20% RBF kasar dan halus meningkatkan tekan dan kepadatan beton. Selain itu, ditemukan bahwa beton memiliki porositas yang lebih rendah ketika digunakan rasio yang lebih rendah. Ini meningkatkan 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 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°C/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/m³, 400 kg/m³, dan 450 kg/m³. 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.

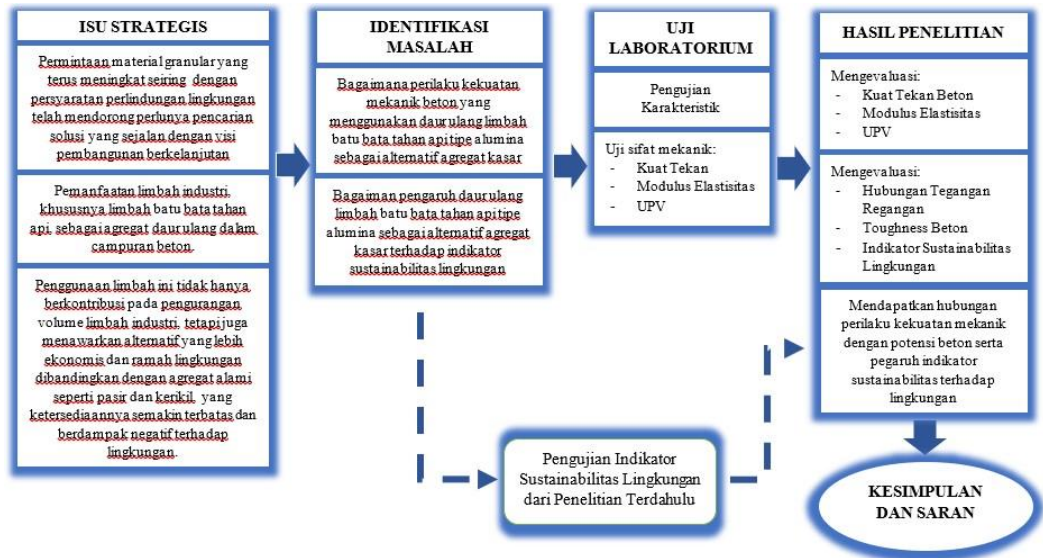
Nematzadeh dan Baradaran-Nasiri (2018) tentang perilaku tegangan-regangan tekan beton yang mengandung agregat halus dari limbah batu bata tahan api (RRBC) tipe alumina bersama dengan semen aluminat dan semen portland biasa setelah terpapar suhu tinggi. Penelitian ini menggunakan RRBC dengan tingkat penggantian 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 1000°C. Parameter yang diperiksa dalam penelitian ini adalah kuat tekan, modulus elastisitas, tegangan regangan puncak, toughness, dan membandingkan kurva tegangan regangan setelah terpapar suhu tinggi dengan kode internasional. menyelidiki 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 0, 25, 50, 75, dan 100%. Kelompok studi terdiri dari semen portland biasa dan semen kalsi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton yang mengandung semen biasa mengalami penurunan sifat mekanik yang signifikan pada suhu 4000°Celsius dan beton yang mengandung semen aluminat pada 1100°Celsius. Selain itu, jika agregat halus digunakan sebagai pengganti batu bata tahan api, sifat tekan beton meningkat pada suhu yang lebih tinggi.

Zeghad et al. (2017) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana penggunaan limbah batu bata tahan api (RWB) sebagai bahan pelengkap untuk menghasilkan beton bertulang berbasit serat kinerja tinggi (HPFRC) ketika digunakan sebagai penggantian total silica fume. Dalam penelitian ini, tiga jenis batu bata tahan api (batu bata yang berbahan dasar utama alumina (BRAL), magnesita (BRMG), dan silika-zirkonium (BRZR) yang ditumbuk halus digunakan. Dosis silika yang digunakan pada beton kontrol tetap konstan dan sebanding dengan dosis asap silika. Selain itu, semua bagian, seperti rasio air/pengikat, tetap konsisten saat menggunakan superplastisizer. Karakteristik beton segar dan keras diuji dalam penelitian ini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa limbah batu bata tahan api dapat digunakan sebagai tambahan untuk campuran beton atau sebagai campuran semen.

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.

1.4 Desain Konseptual



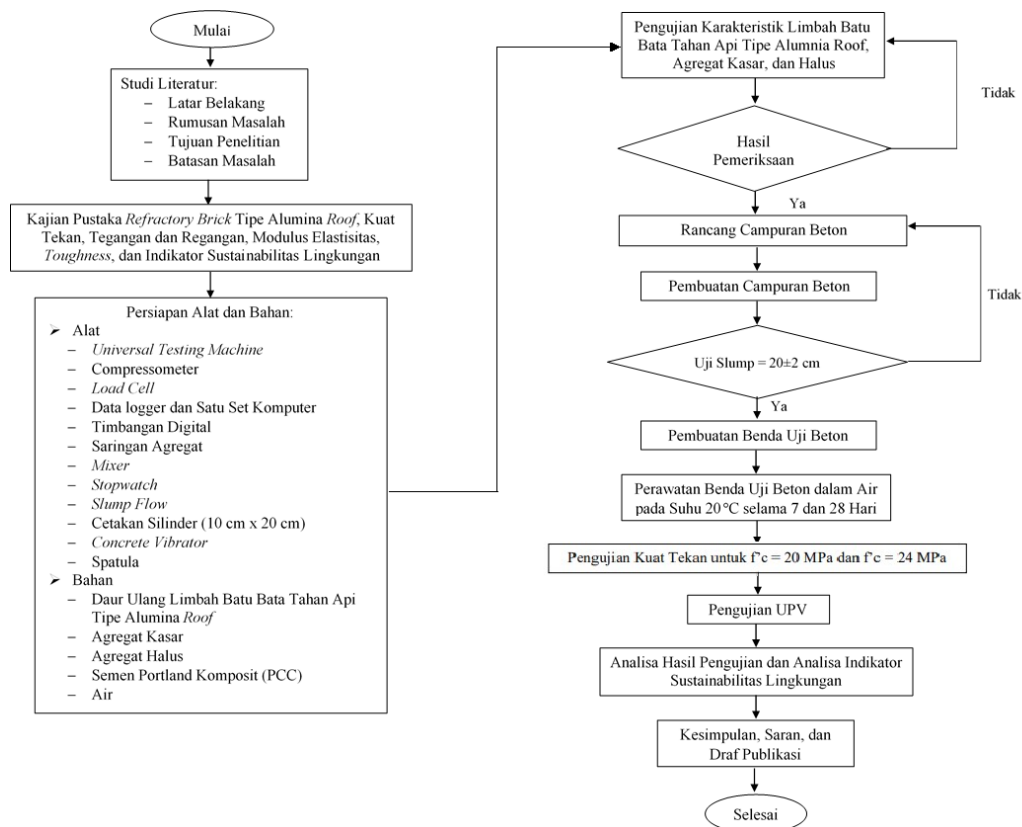
Gambar 4. Desain Konseptual

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Metode Penelitian

Metode penelitian ini dapat disusun secara sistematis dalam bentuk diagram alir pada Gambar 4 sebagai berikut:



Gambar 5 Diagram Alir Penelitian

Sebagai penelitian ilmiah, penelitian harus dilaksanakan dalam sistematika dan urutan yang jelas dan teratur sehingga hasilnya dapat dipertanggung jawabkan.

Tahapan pelaksanaan dari penelitian ini dibagi dari beberapa tahap, yaitu:

1. Tahap I Persiapan

Pada tahap ini dilakukan studi literature dan menentukan metode eksperimental yang sesuai untuk digunakan dalam melakukan penelitian. Kemudian dilakukan

persiapan bahan dan peralatan yang dibutuhkan agar penelitian dapat berjalan dengan lancar.

2. Tahap II Pembuatan Benda Uji

Pada tahap ini dilakukan pekerjaan sebagai berikut:

- a. Siapkan material
- b. Timbang material sesuai dengan proporsinya
- c. Kemudian masukkan kedalam mixer
- d. Diaduk selama 1 menit
- e. Dimasukkan air sedikit demi sedikit secara merata
- f. Hasil pencampuran dimasukkan kedalam cetakan sebanyak $\frac{1}{2}$ dari cetakan benda uji kemudian diratakan sebanyak 25 kali tumbukan, lalu benda uji divibrator selama 10 detik.
- g. Selanjutnya campuran dimasukkan kembali dibenda uji sampai full kemudian diratakan sebanyak 25 kali tumbukan kembali, lalu benda uji divibrator kembali selama 10 detik.
- h. Dan benda uji dilepaskan dari cetakan dan diletakkan ditempat yang dapat dilakukan perawatan.

3. Tahap III Perawatan (*curing*)

Pada tahap ini dilakukan perawatan terhadap benda uji yang telah dibuat pada tahap II. Perawatan dilakukan dengan cara menyiram benda uji setiap hari sampai umur 28 hari

4. Tahap VI Pengujian

Pada tahap ini dilakukan pengujian berat jenis, kuat tekan, upv, dan keausan agregat dengan mesin abrasi los angeles.

5. Tahap V Analisa Data

Pada tahap ini, data yang diperoleh dari hasil pengujian dianalisis untuk mendapatkan hubungan antara variabel yang diteliti dalam penelitian.

6. Tahap VI Pengambilan Kesimpulan

Pada tahap ini, data yang telah dianalisa dibuat suatu kesimpulan yang berhubungan dengan tujuan penelitian.

2.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin Makassar. Penelitian ini mulai dilaksanakan pada bulan Maret 2024.

2.3 Jenis dan Sumber Penelitian

Penelitian ini melaksanakan beberapa pengujian di laboratorium, yang terdiri dari pengujian kuat tekan dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV). Untuk memperoleh data, digunakan dua metode pengumpulan data, yaitu:

- a. Studi Pustaka, yang bertujuan untuk mendapatkan data sekunder melalui pembacaan berbagai buku, jurnal, dan artikel ilmiah sebagai landasan teori dalam penelitian ini.
- b. Pengujian sampel di laboratorium, yang bertujuan untuk memperoleh data yang akan digunakan dalam menganalisis hasil penelitian ini.

2.4 Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.) kapasitas 1000 kN
2. Compressometer untuk mendapatkan nilai regangan benda uji beton
3. *Load Cell* kapasitas 200 kN untuk mengukur dan memverifikasi beban beban tekan
4. Data logger dan satu set komputer yang berfungsi untuk memonitor, mencatat, dan merekam beban dan deformasi yang terjadi
5. Plat Baja
6. Timbangan digital
7. Spatula
8. Saringan ukuran 1½", 1", ¾", dan no.4
9. Mesin pencampur bahan (mixer)
10. *Stopwatch*
11. Alat uji *slump flow*
12. Cetakan silinder (tinggi 20 cm dan diameter 10 cm)
13. *Concrete vibrator*

Bahan yang digunakan terdiri dari:

1. *Refractory Bricks Furnace Roof* (Batu Bata Tahan Api) yang mengandung alumina yang berasal dari PT. Vale Indonesia Tbk pada Gambar 6.
2. Semen Portland Komposit (*Portland Composite Cement*, PCC) pada Gambar 8.
3. Agregat halus, yaitu pasir yang berasal dari PT. Vale Indonesia Tbk. Pada Gambar 7.
4. Air yang digunakan adalah air bersih pada Gambar 9.



Gambar 6

Refractory Brick Furnace Roof tipe Alumina



Gambar 7

Pasir



Gambar 8

Semen Portland Komposit (PCC)



Gambar 9

Air

2.5 Pemeriksaan Karakteristik Material

Pemeriksaan karakteristik dilakukan pada limbah batu bata tahan api, agregat kasar, dan agregat halus sebelum digunakan sebagai campuran dalam pembuatan beton. Pengujian karakteristik agregat dilakukan berdasarkan spesifikasi Standar Nasional Indonesia (SNI) yang telah ditetapkan. Adapun standar rujukan pemeriksaan karakteristik agregat ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Pengujian Karakteristik Fisik Material Agregat

No.	Jenis pemeriksaan	Standar rujukan pemeriksaan	
		Agregat kasar	Agregat halus
1	Pemeriksaan Analisa Saringan	SNI 03-1968-1990	SNI 03-1968-1990
2	Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air	SNI 1969:2016	SNI 1970:2008
3	Pemeriksaan Kadar Air	SNI 1971:2011	SNI 1971:2011
4	Pemeriksaan Keausan	SNI 2417:2008	-

2.6 Rancangan Campuran Beton (Mix Design)

Rancangan campuran beton dilakukan dengan proses *trial mix* untuk memperoleh komposisi campuran yang proporsional untuk beton dengan target mutu $f'c = 20$ MPa dan $f'c = 24$ MPa dengan faktor air semen (fas) masing – masing adalah 0.52 dan 0.49. Delapan variasi campuran beton dibuat menggunakan limbah *Refractory Brick Furnace* (RBF) sebagai substitusi agregat kasar sebesar 0%, 15%, 30%, dan 50% dari volume agregat. Pada penelitian ini, kandungan 0% RBF berperan sebagai *Normal Weight Concrete* (NWC). Komposisi campuran beton (*mix design*) yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Rancangan campuran beton (mix design)

No.	Mix ID	Fas	Air (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)	Batu pecah (kg/m ³)	RBF (kg/m ³)	Target mutu
1	NWC		237	457	753	1132	0	
2	15%RBF	0,52	237	457	753	962	159	f' _c 20 MPa
3	30%RBF		237	457	753	793	318	
4	50%RBF		237	457	753	566	531	
5	NWC		236	486	741	1115	0	
6	15%RBF	0,49	236	486	741	948	157	f' _c 24 MPa
7	30%RBF		236	486	741	781	314	
8	50%RBF		236	486	741	558	523	

2.7 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji beton yang terbuat dari limbah batu bata tahan api (RBF) tipe alumina sebagai substitusi parsial agregat kasar ditunjukkan secara ringkas pada Gambar 5. Sebelum menggunakan limbah batu bata tahan api (RBF) sebagai agregat dalam campuran beton, RB diberikan perlakuan awal dengan cara direndam di dalam air selama 4 jam kemudian dikeringkan hingga mencapai kondisi kering permukaan (SSD). Pendekatan ini dilakukan untuk mengurangi hilangnya air selama pencampuran karena tingginya penyerapan air oleh RBF. Pendekatan ini sesuai dengan metodologi yang diterapkan oleh Khattab *et al.* (2021).

Pembuatan sampel beton dilakukan dengan menggunakan *mixer* berkapasitas 75 liter. Pertama, agregat limbah batu bata tahan api, batu pecah, pasir dan semen dimasukkan ke dalam mixer dan dicampur selama 60 detik. Selanjutnya, air ditambahkan secara bertahap ke dalam mixer, dan pencampuran dilanjutkan selama 120 detik. Kemudian, campuran beton diaduk secara manual agar bahan – bahan yang menempel pada bagian bawah dan dinding mixer tercampur rata. Pencampuran menggunakan mixer dilanjutkan selama 60 detik hingga diperoleh kombinasi campuran beton segar yang merata. Campuran beton segar selanjutnya dilakukan uji slump, kemudian dituangkan ke dalam cetakan silinder besi berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm, lalu dipadatkan selama 60 detik menggunakan mesin vibrator. Selanjutnya, campuran beton didiamkan selama 24 jam sebelum cetakan dibuka, dan sampel beton direndam dalam air bersih pada suhu konstan 20°C sampai hari pengujian. Jumlah sampel benda uji yang dibuat adalah 48 sampel sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Tabel identifikasi benda uji beton

No.	Variasi	Target mutu (f'c)	Umur benda uji	Jumlah benda uji
1	NWC	20 MPa	7	3
			28	3
2	15%RBF		7	3
			28	3
3	30%RBF		7	3
			28	3
4	50%RBF		7	3
			28	3
5	NWC	24 MPa	7	3
			28	3
6	15%RBF		7	3
			28	3
7	30%RBF		7	3
			28	3
8	50%RBF		7	3
			28	3
Jumlah keseluruhan benda uji				48



Gambar 10 Proses pembuatan benda uji beton

2.8 Pemeriksaan Slump Test pada Beton

Pengujian slump pada beton dilakukan untuk mengevaluasi homogenitas dan kemudahan pengerjaan (*workability*) adukan beton segar dalam proses pemadatan, pemindahan ke dalam cetakan, serta kemampuannya untuk saling mengikat dan tetap stabil tanpa mengalami pemisahan bahan penyusun beton (*segregasi*), sehingga menghasilkan penyelesaian akhir yang baik. Slump beton dapat didefinisikan sebagai penurunan ketinggian dari pusat permukaan atas beton yang diukur segera setelah cetakan slump test diangkat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Prosedur pemeriksaan *slump test* pada beton dilakukan berdasarkan SNI 1972 (2008).



Gambar 11 Pemeriksaan uji slump beton

2.9 Perawatan Benda Uji

Perawatan (*curing*) benda uji beton dilakukan setelah beton mengeras. Kegiatan *curing* pada benda uji beton bertujuan untuk menjaga kelembapan beton agar dapat menghasilkan beton dengan mutu yang baik. Pada penelitian yang dilakukan, semua variasi benda uji beton di *curing* menggunakan air pada suhu 20°C selama 7 dan 28 hari. Proses perawatan (*curing*) benda uji beton ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 12 Perawatan (*curing*) benda uji beton

2.10 Pengujian Benda Uji

2.10.1 Pengujian kuat tekan beton silinder

Pengujian kuat tekan atau *compressive strength test* dilakukan pada benda uji silinder beton berukuran 10 cm x 20 cm yang berumur 7 dan 28 hari. Pengujian kuat tekan dilakukan berdasarkan SNI 1974 (2011) menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas 1000 kN serta menggunakan *load cell* berkapasitas 200 kN untuk mengukur dan memverifikasi beban tekan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12. Beban diterapkan pada permukaan benda uji dengan kecepatan pembebanan sebesar 0.24 MPa/detik sampai benda uji hancur. Pengujian

kuat tekan beton dilakukan pada tiga benda uji dari setiap variasi campuran beton, dan nilai rata – rata dari ketiga benda uji akan digunakan untuk penilaian kuantitatif.



Gambar 13 Pengujian kuat tekan

2.10.2 Pengujian modulus elastisitas beton

Nilai modulus elastisitas diperoleh berdasarkan dari hasil pembacaan perilaku tegangan dan regangan benda uji beton silinder berukuran 10 cm x 20 cm yang berumur 28 hari dibawah beban tekan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13. Penentuan nilai modulus elastisitas mengacu pada ASTM C469 (2014). Modulus elastisitas beton didapatkan dari nilai rata – rata dari ketiga benda uji untuk setiap variasi campuran beton.

*Universal testing
machine (UTM) 1000
kN*

Load cell 200 kN

Compressometer

Benda uji beton silinder



Gambar 14 Pengujian modulus elastisitas

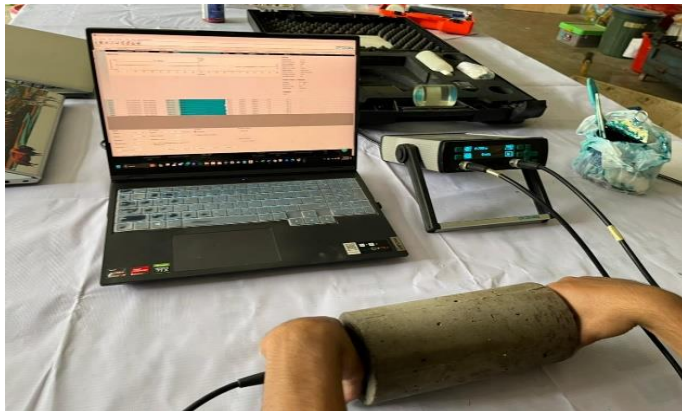
2.10.3 Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dilaksanakan berdasarkan Standar Nasional Indonesia SNI ASTM C597:2012 mengenai Metode Uji Kecepatan

Rambat Gelombang Melalui Silinder. Alat yang digunakan dalam pengujian UPV adalah Ultrasonic Pulse Velocity Proceq Pundit Lab+. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan kecepatan rambat gelombang pada silinder. Setiap variasi terdiri dari lima sampel yang akan diuji dengan metode langsung. Oleh karena itu, nilai kecepatan rambat gelombang yang diperoleh merupakan nilai rata-rata kecepatan dari setiap sampel pada setiap variasi.

Berikut Gambar 14 Pengujian UPV dan Prosedur pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel yang akan diuji
2. Menyiapkan alat UPV *Proceq Pundit Lab+* yang akan digunakan dengan
3. memasang transduser penerima dan penguat (*Amplifier*)
4. Memasang gemuk pada ujung sampel yang akan diletakkan transduser
5. Memulai pembacaan kecepatan rambat gelombang pada alat
6. Mencatat hasil kecepatan rambat gelombang dari alat



Gambar 15 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity*

2.11 Indikator Sustainability Lingkungan

Indikator sustainability lingkungan pada penelitian ini yang bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan dari RBF dibandingkan dengan berbagai pilihan limbah industri, dengan fokus khusus pada bahan dibawah beban tekan. Hasilnya dapat berguna bagi para insinyur desain dalam mengambil keputusan berdasarkan sudut pandang berkelanjutan, yang kini menjadi kriteria desain yang semakin penting. Dimana kajian ini dilakukan berdasarkan asumsi-asumsi yang sesuai dengan teknologi terkini, dengan menggunakan data yang tersedia saat ini. Parameter yang dilakukan pada kinerja lingkungan di penelitian ini adalah GWP (*Global Warming Potential*), POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*), AP (*Acidification Potential*), dan EP (*Eutrophication Potential*) dengan mengkaji literatur saintiik yang terpercaya. Tabel 6 memperlihatkan nilai-nilai GWP, AP, EP, dan POCP untuk material Semen PPC, pasir, air, *Refractory Brick*, dan FA digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari literatur.

Tabel 6 Data dampak lingkungan dari produksi material beton

Sources	Material (1kg)	GWP (Kg-CO ₂ eq)	AP (Kg-SO ₂ eq)	EP (Kg-PO ₄ eq)	POCP (Kg-C ₂ H ₄ eq)
Blengini, Ohemeng et al (Ohemeng & Naghizadeh, 2023)	PPC	9.51.E-01	2.76.E-03	3.60.E-04	7.75.E-05
Braga, Ohemeng et al. (Margarida et al., 2015)	Sand	9.87.E-03	4.58.E-05	1.08.E-05	2.80.E-6
Braga et al. (Margarida et al., 2015)	Water	1.33.E-04	3.87.E-08	9.70.E-07	3.87.E-8
Won-Jun P et al. (Won Jun P. et al., 2017)	RBF	2.94.E-02	2.93.E-05	5.44.E-06	1.25.E-05
Majhi et al., Kurda et al. (Majhi & Nayak, 2020)	CA	2.44.E-02	1.44.E-04	3.18.E-05	7.83.E-06

Penelitian ini mengadopsi efesiensi kekuatan beton terhadap indikator lingkungan (Park, Kim, Roh, & Kim, 2019) menjadi indikator sustainabilitas yang melibatkan kuat tekan beton performa kekuatan beton daur ulang limbah batu bata tahan api terhadap lingkungan. Dalam penelitian ini menyediakan beberapa faktor simultan yang mencakup kuat lentur dengan parameter lingkungan (GWP, POCP, AP, dan EP) seperti pada persamaan 11, 12, 13, dan 14.

$$IS_{GWP-Cs} = \frac{C_s}{GWP_{mix}} \quad (11)$$

$$IS_{POCP-Cs} = \frac{C_s}{POCP_{mix}} \quad (12)$$

$$IS_{AP-Cs} = \frac{C_s}{AP_{mix}} \quad (13)$$

$$IS_{EP-Cs} = \frac{C_s}{EP_{mix}} \quad (14)$$

Dimana:

IS_{GWP-Cs} = GWP_{mix} total nilai yang diperoleh dari *mix design* yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgCO₂)

GWP_{mix} = GWP diperoleh dari *mix design* yang digunakan (kgCO₂)

$IS_{POCP-Cs}$ = $POCP_{mix}$ total nilai yang diperoleh dari *mix design* yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSb)

$POCP_{mix}$ = POCP diperoleh dari *mix design* yang digunakan (kgSb)

- IS_{AP-C_s} = AP_{mix} total nilai yang diperoleh dari *mix design* yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSO₂)
- AP_{mix} = AP diperoleh dari *mix design* yang digunakan (kgSO₂)
- IS_{EP-C_s} = EP_{mix} total nilai yang diperoleh dari *mix design* yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgPO₄)
- EP_{mix} = EP diperoleh dari *mix design* yang digunakan (kgPO₄)
- C_s = kuat tekan (MPa)