

**KINERJA PAVING BLOCK DENGAN LIMBAH BATU BATA TAHAN
API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGANTI PASIR**

***PERFORMANCE OF PAVING BLOCK USING MAGNESIA- TYPE
REFRACTORY BRICKWASTE AS A SAND SUBSITITUTE***



MUH RISAL

D012221005

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024



**KINERJA PAVING BLOCK DENGAN LIMBAH BATU BATA TAHAN
API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGANTI PASIR**

***PERFORMANCE OF PAVING BLOCK USING MAGNESIA- TYPE
REFRACTORY BRICKWASTE AS A SAND SUBSITITUTE***

Disusun dan ajukan oleh

MUH RISAL

D012221005



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

2024

PENGAJUAN TESIS

**KINERJA PAVING BLOCK DENGAN LIMBAH BATU BATA TAHAN
API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGANTI PASIR**

Tesis

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

Disusun dan diajukan oleh

MUH RISAL

D012221005

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2024

TESIS**KINERJA PAVING BLOCK DENGAN LIMBAH BATU BATA TAHAN
API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGANTI PASIR****MUH RISAL
D012221005**

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

Pembimbing Pendamping



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

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Bami, 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 bertanda tangan di bawah ini

Nama : Muh Risal
Nomor mahasiswa : D012221005
Program studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul "Kinerja Paving Block Dengan Limbah Batu Bata Tahan Api Tipe Magnesia" Sebagai Pengganti Pasir" adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng. dan Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah diproses di *construction and building materials* dengan status *under review (revisi)* sebagai artikel dengan judul "*Technical Feasibility Study of Using Spent Magnesia-Chrome Refractory Bricks in Concrete Paving Blocks*"

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

Gowa, 29 November 2024

Menyatakan,

METERA
TEMPE
G75AMX/05207254

MUH RISAL

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh kerendahan hati penulis panjatkan puji dan syukur kehadiran Tuhan yang maha esa atas limpahan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan susunan Tesis ini yang merupakan salah satu persyaratan akademik guna menyelesaikan studi magister pada Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Dalam tulisan ini penulis menyajikan pokok bahasan menyangkut masalah dibidang struktur, dengan judul : **“KINERJA PAVING BLOCK DENGAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGANTI PASIR”** 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 II yang selalu memberikan arahan dan petunjuk dalam penyusunan Tesis ini.
4. **Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng** selaku pembimbing I yang telah meluangkan waktu dan pengarahan dalam proses penyusunan Tesis ini.
5. **Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawati. ST, MT, Prof. Dr. Ing. Herman Parung.,M.Eng** dan **Dr.Eng. Fakhruddin.,ST.,M.Eng** selaku penguji.
6. Serta seluruh dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Teman-teman **Laboratorium Riset Eco Material 2022-1 dan 2023-1** yang selalu menemani dalam penyelesaian penulisan tesis ini
8. Orang Tua Tercinta **Syamsuddin samad S.sos** . dan **Sitti syahriah S.pd** yang selalu memberi motivasi dan bantuan baik moral maupun materil. Dan terutama nenek tercinta **HJ. Datu sambara** yang selalu memberikan semangat.

Gowa, 29 November 2024

Penyusun

Muh Risal

ABSTRAK

MUH RISAL . **KINERJA PAVING BLOCK DENGAN LIMBAH BATU BATA TAHAN API TIPE MAGNESIA SEBAGAI PENGANTI PASIR.** (dibimbing oleh Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

Penelitian ini mengevaluasi kinerja paving block (PB) dengan penggunaan limbah batu bata tahan api tipe magnesia (RBC) sebagai pengganti pasir, yang diharapkan dapat menjadi solusi ramah lingkungan sekaligus meningkatkan kualitas PB. Limbah batu bata tahan api dari PT Vale Indonesia Tbk dipilih sebagai alternatif agregat, mengingat karakteristiknya yang tahan panas dan berpotensi memperkuat material PB. Uji laboratorium dilakukan dengan variasi substitusi limbah batu bata tahan api sebesar 15%, 30%, 50%, dan 100% untuk mengevaluasi kekuatan tekan, kuat lentur, durabilitas, penyerapan air, serta analisis mikrostruktur menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi hingga 30% meningkatkan kekuatan tekan dan daya tahan PB, sedangkan peningkatan lebih dari 50% justru mengurangi performa material akibat tingginya porositas. Analisis SEM mengidentifikasi distribusi pori-pori dan mikro-retakan yang memengaruhi ketahanan material. Penggunaan RBC tidak hanya mengurangi ketergantungan pada pasir alam, tetapi juga memberikan solusi pengelolaan limbah yang berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada inovasi material konstruksi yang mendukung keberlanjutan lingkungan sekaligus memberikan nilai tambah ekonomi pada limbah industri.

Kata Kunci: Batu Bata Tahan Api, Kuat Tekan, *Ultrasonic Pulse Velocity*, Penyerapan Air, Abrasi dan Analisis SEM.

ABSTRACT

MUH RISAL . ***PERFORMANCE OF PAVING BLOCK USING MAGNESIA- TYPE REFRACTORY BRICKWASTE AS A SAND SUBSTITUTE.*** (guided by Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

This research evaluates the performance of PB using magnesia-type refractory brick waste as a sand replacement, aiming to provide an environmentally friendly solution while enhancing the quality of PB. Refractory brick waste from PT Vale Indonesia Tbk was chosen as an alternative aggregate due to its heat-resistant characteristics and potential to strengthen PB material. Laboratory tests were conducted with substitution variations of refractory brick waste at 15%, 30%, 50%, and 100% to evaluate compressive strength, flexural strength, durability, water absorption, and microstructure analysis using Scanning Electron Microscope (SEM). The results indicate that substitution up to 30% improves the compressive strength and durability of the PB, while increasing beyond 50% reduces material performance due to high porosity. SEM analysis identified pore distribution and micro-cracks that impact material durability. The use of refractory brick waste not only reduces dependency on natural sand but also offers a sustainable waste management solution. Consequently, this research contributes to construction material innovation that supports environmental sustainability while adding economic value to industrial waste.

Keywords: Refractory Brick, Compressive Strength, Ultrasonic Pulse Velocity, Water Absorption, Abrasion, and SEM Analysis

DAFTAR ISI

UCAPAN TERIMA KASIH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
BAB I PENDAHULUAN	14
1.1. Latar Belakang	14
1. Rumusan Masalah	14
2. Tujuan Penelitian.....	15
3. Manfaat Penelitian	15
4. Batasan Masalah.....	15
1.2. Teori	15
1.2.1 Paving Block	15
1.2.1.1. Klasifikasi.....	16
1.2.1.2 Syarat Mutu.....	16
1.2.1.3 Bentuk dan Dimensi PB	17
1.2.1.4 Keuntungan PB.....	17
1.2.1.5 Kelemahan PB	17
1.2.2 Bahan Penyusun PB.....	17
1.2.2.1 Semen.....	18
1.2.2.2 Jenis Jenis Semen	18
1.2.2.3 Semen portland di Indonesia dapat dibagi menjadi beberapa tipe yaitu:	19
1.2.2.4 Agregat Halus	19
1.2.2.5 Refractory Brick.....	21
1.2.2.6 Air	23
1.2.3 Pengujian Kuat Tekan	23
1.2.4 Porositas Beton	24
1.2.5 Penyerapan Air PB	24

1.2.6 Kuat lentur	24
1.2.6.1 Faktor yang mempengaruhi kuat lentur PB	25
1.2.6.2 Standar pengujian kuat lentur	25
1.2.7 Analisis SEM	25
1.2.7.1 Prinsip kerja SEM	26
1.2.7.2 Persiapan sampel	26
1.2.7.3 Prosuder pengujian SEM	26
1.2.7.4 Kelebihan dan kekurangan SEM	26
1.2.8 Abrasi Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angeles	27
1.2.8.1 Jenis-jenis keausan dan penyebabnya :	27
1.2.8.2 Hal-hal yang terjadi selama proses keausan, yaitu:	27
1.2.8.3 Pembagian Gradasi	28
1.2.9 Desain Konseptual	29
1.2.10 Penelitian Terdahulu	30
BAB II.....	33
METODE PENELITIAN.....	33
2.1. Metode Penelitian	33
2.2. Tempat dan Waktu Penelitian.....	35
2.3. Jenis dan Sumber Penelitian	35
2.4. Pemeriksaan Karakteristik Semen	35
2.5. Alat dan Bahan Penelitian	35
2.6. Desain Benda Uji.....	36
2.7. Pembuatan Benda Uji	38
2.8. Pengujian Benda Uji	39
2.8.1 Pengukuran berat satuan kering	39
2.8.2 Uji Kuat Tekan Paving Block.....	39
2.8.3 Uji Penyerapan Air PB	40
2.8.4 Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).....	41

2.8.5 Pengujian Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angeles	42
2.8.6 Analisis Pengujian SEM	42
2.8.7 Pengujian Kuat Lentur.....	43
BAB III.....	44
HASIL DAN PEMBAHASAN	44
3.1. Berat satuan kering	44
3.2. Hasil Pengujian Penyerapan Air	44
3.3. Pengujian kuat tekan	46
3.4. Pengujian Kuat Lentur.....	48
3.5. Porositas.....	49
3.6. UPV	50
3.7. Pengujian Abrasi.....	52
3.8. Analisis SEM	53
BAB IV	56
KESIMPULAN.....	56
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN	64
LAMPIRAN	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 klasifikasi Paving block.....	16
Gambar 2 Diagram alur penelitian	34

Gambar 3 <i>Refractory Brick</i> tipe magnesita	36
Gambar 4 Agregat halus	36
Gambar 5 air tawar.....	36
Gambar 6 Benda uji.....	37
Gambar 7 Pembuatan benda uji	39
Gambar 8 Pengujian kuat tekan.....	40
Gambar 9 pengujian penyerapan air paving block.....	41
Gambar 10 pengujian UPV paving block	41
Gambar 11 pengujian keuasan agregat	42
Gambar 12 Perubahan berat satuan PB terhadap kandungan RBC	45
Gambar 13 Variasi penyerapan air terhadap kandungan RBC.....	45
Gambar 14 Korelasi linier antara penyerapan air dan berat satuan	46
Gambar 15 Kekuatan tekan dan lentur PB pada berbagai Tingkat RBC	47
Gambar 16 Korelasi antara kuat tekan dan kuat lentur Porositas	48
Gambar 17 Porositas PB dengan berbagai kandungan RBC	49
Gambar 18 Korelasi antara porositas dan sifat mekanik PB dengan berbagai jenis penggantian RBC.....	50
Gambar 19 Variasi nilai UPV Paving block yang mengandung RBC.....	51
Gambar 20 . Korelasi antara (a) UPV vs kekuatan tekan dan lentur dan (b) UPV vs kekuatan lentur. Porositas.....	51
Gambar 21 Kehilangan berat abrasi PB dengan berbagai kandungan SRCMB melalui uji	53
Gambar22 Hubungan antara kehilangan berat akibat abrasi dengan kekuatan tekan.....	53
Gambar 25 Fitur mikrostruktur kontrol, 30RBC dan 100SMC.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 1 sifat – sifat fisik (SNI 03-0691-1996.....	17
------------------------------------------------------------	-----------

Tabel 2 Jenis refractory.....	22
Tabel 3 Mix desain Paving block	22
Tabel 3 Bahan baku refractory jenis netral.....	37
Tabel 4 Variasi benda uji Paving block.....	37
Tabel 5 Syarat mutu pada sifat fisik ketahanan AUS paving block.....	42

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PT Vale Indonesia Tbk, produsen nikel Indonesia, memproduksi produk matte setengah jadi dari bijih laterit di fasilitas penambangan dan pengolahan terintegrasi di dekat Sorowako di pulau Sulawesi. Saat ini, PT.Vale Indonesia memproduksi sekitar 4.500 ton atau 150 meter kubik dinding tungku per tahun yang tergolong limbah. Oleh karena itu, pembuangan limbah batu bata refraktori (RBC) akan berdampak pada lingkungan sekitar tambang. Penggunaan RBC sebagai pengganti agregat saat ini masih terbatas karena bata remanufaktur terkontaminasi logam berbahaya dari proses peleburan bijih nikel internal PT.Vale Indonesia. Penerapan RBC sebagai agregat, jika digunakan secara luas akan memberikan dampak ekonomi yang sangat besar bagi dunia usaha, pemerintah dan masyarakat sekitar.

RBC adalah suatu bahan yang kekuatannya bertahan pada suhu tinggi. Batu RBC yang digunakan sebagai isolator panas, refraktori bekas diproduksi di semua unit pengolahan (dryer, reduction kiln, furnace dan converter). Berdasarkan komposisi kimia penyusunnya, material refraktori dapat dibedakan menjadi beberapa jenis yaitu refraktori asam seperti silika, refraktori netral seperti magnesita dan refraktori basa seperti magnesit, serta refraktori khusus seperti karbo, silikon karbida, dan lainnya

Paving Block (PB) adalah suatu komposisi bahan bangunan yang terbuat dari campuran semen portland atau bahan perekat hidrolis sejenisnya, air dan agregat dengan atau tanpa bahan tambahan lainnya yang tidak mengurangi mutu bata beton (SNI 03-0691-1996). Syarat mutu PB yaitu pertama sifat tampak, bata beton harus mempunyai permukaan yang rata, tidak terdapat retak-retak dan cacat, bagian sudut dan rusuknya tidak mudah dirapihkan dengan kekuatan jari tangan. Kedua ukuran, bata beton harus mempunyai ukuran tebal nominal minimum 60 mm dengan toleransi + 8%. Ketiga sifat fisika, bata beton harus mempunyai sifat-sifat fisika seperti pada tabel 1 (SNI 03-0691-1996). Kemudian penulis berinisiatif untuk mengangkat judul “**Kinerja Paving Block Dengan Limbah Batu Bata Tahan Api Tipe Magnesita Sebagai Pengganti Pasir**”.

1. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dirumuskan beberapa masalah:

1. Bagaimana perilaku mekanik PB dengan limbah batu bata tahan api tipe magnesita (RBC) sebagai pengganti pasir.
2. Bagaimana durabilitas PB dengan limbah batu bata tahan api tipe magnesita (RBC) sebagai pengganti pasir.

2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisa perilaku mekanik PB dengan limbah batu bata tahan api tipe magnesia (RBC) sebagai pengganti pasir.
2. Mengevaluasi durabilitas PB dengan limbah batu bata tahan api tipe magnesia (RBC) sebagai pengganti pasir.

3. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan wawasan mengenai kinerja PB dengan limbah batu bata tahan api tipe magnesia sebagai pengganti pasir.

4. Batasan Masalah

Mengingat banyak hal yang dapat mempengaruhi dalam suatu perencanaan PB, maka permasalahan dalam penulisan tesis ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut :

1. Refraktori Brik (batu bata tahan api) yang digunakan ialah batu bata tahan api tipe magnesia. (RBC)
2. Pedoman yang dipakai sebagai acuan adalah SNI 03-0691-1996.
3. Semen yang digunakan pada penelitian ini diproduksi oleh PT. Semen Tonasa dan memenuhi standar SNI-2049-2015.
4. Limbah batu bata tahan api yang digunakan sebagai pengganti pasir berasal dari PT. Vale Indonesia.
5. Berdasarkan Tabel 4, Lampiran IX PP No. 22 Tahun 2021, Limbah Refraktori dikategorikan sebagai Limbah B3 dengan kode limbah B417 dengan kategori bahaya termasuk Kategori 2.
6. Air yang digunakan adalah air sumur bor yang berada di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.
7. Benda uji berbentuk Persegi Panjang dengan ukuran = 20 x 10 x 6
8. Jumlah benda uji yang direncanakan 5 variasi masing-masing terdiri dari 5 benda uji.

1.2. Teori

1.2.1 Paving Block

PB merupakan produk bahan bangunan dari semen yang digunakan sebagai salah satu alternatif penutup atau pengeras permukaan tanah. Sebagai bahan penutup dan pengeras permukaan tanah. Pavung block sangat luas penggunaannya untuk keperluan, biasanya PB digunakan untuk pengerasan dan memperindah trotoar jalan di kota-kota, halaman taman dan jalan kompleks perumahan.

PB adalah bahan konstruksi yang terutama digunakan di jalan, jalan masuk, trotoar, garasi, dan tempat parkir. mendefinisikan PB sebagai bahan komposit yang terbuat dari semen Portland atau bahan perekat hidrolik sejenis, air, dan agregat. Meningkatnya permintaan PB sebagai bahan konstruksi mengakibatkan kebutuhan semen untuk pembuatan PB semakin meningkat. Pengurangan penggunaan semen dalam pembuatan material berbasah dasar semen seperti mortar, beton, dan PB dapat menurunkan emisi CO₂ dari produksi semen secara signifikan, yang menghasilkan 0,9 ton CO₂ untuk setiap 1,0 ton semen

Bata beton (PB) dapat berwarna seperti warna aslinya atau diberi zat warna pada komposisinya dan digunakan halaman baik di dalam maupun di luar bangunan.(SNI03-0691-1996).

1.2.1.1. Klasifikasi

Terdapat beberapa klasifikasi dalam PB diantaranya:

1. Bata beton mutu A = Digunakan untuk jalan.
2. Bata beton mutu B = Digunakan untuk peralatan parkir.
3. Bata beton mutu C = Digunakan untuk pejalan kaki.
4. Bata beton mutu D = Digunakan untuk taman dan penggunaan lain



Mutu A



Mutu B



Mutu C



Mutu D

Gambar 1. Klasifikasi Paving Block

1.2.1.2 Syarat Mutu

Adapun beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan mutu PB yaitu memenuhi persyaratan SNI 03-0691- 1996 diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Sifat Tampak Bata beton harus mempunyai permukaan yang rata, tidak terdapat retak-retak dan cacat, bagian sudut dan rusuknya tidak mudah dirapihkan dengan kekuatan jari tangan.
2. Ukuran Bata beton harus mempunyai ukuran tebal nominal minimum 60 mm dengan toleransi +8% .
3. Sifat Fisika Bata beton harus mempunyai sifat-sifat fisika seperti pada tabel berikut:

Tabel 1 Sifat-sifat fisik (SNI 03-0691-1996)

Mutu	Kuat Tekan (MPa)		Ketahanan aus (mm/menit)		Penyerapan Air rata-rata maks.
	Rata-rata	Min.	Rata-rata	Min.	(%)
A	40	35	0,090	0,103	3
B	20	17,0	0,130	0,149	6
C	15	12,5	0,160	0,184	8
D	10	8,5	0,219	0,251	10

1.2.1.3 Bentuk dan Dimensi PB

PB banyak ditemui dipasaran dengan beraneka bentuk dan ketebalan. Pada umumnya dipasaran PB dibuat dengan panjang antara 200~250 mm, dengan lebar antara 100~112 mm. Ketebalan PB berkisar antara 60~100 mm. Sedangkan untuk bentuk PB sendiri rata berbentuk segi empat (holand), segi enam (hexagonal), dan lain sebagainya dengan ketebalan yang bervariasi menurut kebutuhan. Seiring dengan berkembangnya kebutuhan pasar maka bentuk dan variasi PB mulai dikembangkan dan dipasarkan (Nugroho, 2013).

1.2.1.4 Keuntungan PB

Setiawan (2012) dalam Nugroho (2013) menyebutkan keuntungan PB :

- 1 Pelaksanaannya mudah dan tidak memerlukan alat berat serta dapat diproduksi secara masal.
- 2 Pemeliharaannya mudah dan dapat dipasang kembali setelah dibongkar.
- 3 Tahan terhadap beban statis, dinamik dan kejut.
- 4 Tahan terhadap tumpahan bahan pelumas dan pemanasan oleh mesin kendaraan.

1.2.1.5 Kelemahan PB

Setiawan (2012) dalam Nugroho (2013) menyebutkan kelemahan PB

1. Mudah bergelombang bila pondasinya tidak kuat dan kurang nyaman untuk kendaraan dengan kecepatan tinggi.
2. Sehingga perkerasan PB sangat tidak cocok untuk mengendalikan kecepatan kendaraan dilingkungan permukiman dan perkotaan yang padat.

1.2.2 Bahan Penyusun PB

Material yang digunakan dalam pembuatan PB sama dengan material yang digunakan pada pembuatan beton biasanya. Hanya saja ada sebagian yang tidak menggunakan agregat kasar (kerikil). Ditinjau dari fungsinya material pembentuk PB

mempunyai fungsi yaitu semen dan sedikit air membentuk pasta semen yang berfungsi sebagai perekat. Kemudian pasta semen dan campuran agregat halus (pasir) membentuk mortar untuk mengikat agregat kasar (jika pembuatannya menggunakan kerikil) menjadi kesatuan yang kompak dengan campuran yang merata menghasilkan campuran plastis (antara cair dan padat) sehingga dapat dituang dalam acuan serta membentuknya menjadi bentuk yang diinginkan setelah menjadi kering atau padat (Dian, 2010).

1.2.2.1 Semen

Semen berasal dari kata *caementum* (bahasa latin) yang artinya memotong menjadi bagian-bagian kecil tak beraturan. Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia Semen adalah serbuk atau tepung yang terbuat dari kapur dan material lainnya yang dipakai untuk membuat beton, merekatkan batu bata ataupun membuat tembok.

Semen dalam pengertian umum adalah bahan yang mempunyai sifat adhesive dan cohesive, digunakan sebagai bahan pengikat (*bonding material*), yang dipakai bersama-sama dengan batu kerikil dan pasir.

Menurut SNI 7064 – 2014, semen portland komposit adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama – sama terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6 % - 35 % dari massa semen portland komposit. Semen dapat dibagi atas dua kelompok yaitu :

- a. Semen non hidraulis adalah semen yang tidak dapat mengeras dalam air atau tidak stabil dalam air.
Contoh: semen non hidraulis (*hydraulic binder*) adalah lime dimana lime ini merupakan perekat klasik dalam bangunan yang dibuat dengan memanaskan *limestone* pada suhu 850°C.
- b. Semen hidraulis adalah semen yang dapat mengeras dalam air menghasilkan padatan yang stabil dalam air.
Sifat semen hidraulis yaitu : dapat mengeras bila dicampur air, dapat mengeras bila dicampur air, tidak larut dalam air. Contoh: semen hidraulis adalah semen Portland, semen campur, semen khusus dan sebagainya.

1.2.2.2 Jenis Jenis Semen

- a. Semen Putih (*Gray Cement*)
Semen putih adalah semen yang lebih murni dari semen abu dan digunakan untuk pekerjaan penyelesaian (*finishing*), seperti sebagai filler atau pengisi. semen jenis ini dibuat dari bahan utama kalsit (*calcite*) *limestone* murni.
- b. Semen Sumur Minyak (*Oil Well Cement*)

Semen sumur minyak adalah semen khusus yang digunakan dalam proses pengeboran minyak bumi atau gas alam, baik di darat maupun di lepas pantai.

c. **Semen Portland**

Semen portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidraulis dengan gips sebagai bahan tambahan.

1.2.2.3 Semen portland di Indonesia dapat dibagi menjadi beberapa tipe yaitu:

a. Tipe I

Tipe I adalah perekat hidrolisis yang dihasilkan dengan cara menggiling klinker yang kandungan utamanya kalsium silikat dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat. Semen Portland Tipe I dipergunakan pengerasan jalan, gedung, jembatan, dan lain-lain.

b. Tipe II

Semen jenis ini dalam penggunaannya memerlukan ketahanan sulfat dan panas hidrasi sedang. Semen Portland tipe II dipergunakan untuk bangunan tepi laut, bendungan, dan irigasi, atau beton masa yang membutuhkan panas hidrasi rendah.

c. Tipe III

Semen jenis ini dalam penggunaannya memerlukan kekuatan yang tinggi pada fase permulaan setelah terjadi pengikatan.. Semen Portland tipe III dipergunakan untuk bangunan yang memerlukan kekuatan tekan yang tinggi (sangat kuat) seperti, jembatan-jembatan dan pondasi-pondasi berat.

d. Tipe IV

Semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan panas hidrasi rendah. Semen Portland tipe IV dipergunakan untuk kebutuhan pengecoran yang tidak menimbulkan panas, pengecoran dengan penyemprotan (setting time lama).

e. Tipe V

Semen portland yang dalam penggunaannya hanya memerlukan ketahanan yang tinggi terhadap sulfat. Semen Portland tipe V dipergunakan untuk instalasi pengolahan limbah pabrik, konstruksi dalam air, jembatan, terowongan, pelabuhan, dan pembangkit tenaga nuklir.

1.2.2.4 Agregat Halus

Agregat halus (pasir) adalah bahan yang berbahan mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran beton yang memiliki ukuran butiran kurang dari 5 mm atau lolos saringan No.4 dan tertahan pada saringan

No.200. Agregat halus (pasir) berasal dari hasil disintegrasi alami dari batuan alam atau pasir buatan yang dihasilkan dari alat pemecah batu (stone crusher).

Agregat halus yang digunakan harus mempunyai gradasi yang baik, karena akan berfungsi untuk mengisi ruang-ruang kosong yang tidak dapat diisi oleh material lain sehingga menghasilkan beton yang padat disamping untuk mengurangi penyusutan. Analisa saringan akan menunjukkan kategori jenis dari agregat halus tersebut. Melalui analisa saringan maka akan diperoleh angka Fineness Modulus.

Berdasarkan SNI 1969-2016, Agregat halus mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm. Agregat halus yang digunakan pada campuran beton hendaknya tidak mengandung kadar lumpur lebih dari 5%, tidak mengandung zat – zat organik yang turut serta mengurangi mutu dari beton, tidak mengandung bahan reaktif alkali, memiliki kehalusan butir pada rentang 2 mm – 5 mm, serta agregat halus terdiri dari butir yang keras dan tidak mudah pecah.

Melalui Fineness Modulus ini dapat digolongkan 3 jenis pasir yaitu :

Pasir kasar : $2,9 < FM < 3,2$

Pasir sedang : $2,6 < FM < 2,9$

Pasir halus : $2,2 < FM < 2,6$

Agregat halus sering disebut dengan pasir, baik berupa pasir alami yang diperoleh langsung dari sungai atau tanah galian maupun hasil pemecahan. Pada umumnya yang dimaksud dengan agregat halus adalah agregat dengan besar butir kurang dari 4,80 mm. Agregat halus mempunyai peran penting sebagai pembentuk beton dalam pengendalian workability, kekuatan (strength), dan keawetan beton (durability). Pasir sebagai agregat halus harus memenuhi gradasi dan persyaratan yang telah ditentukan (Mulyono, 2005).

Syarat-syarat agregat halus (pasir) dalam Mulyono (2005) sebagai bahan material pembuatan beton sesuai dengan ASTM C 33 adalah sebagai berikut:

1. Material dari bahan alami dengan kekasaran permukaan yang optimal sehingga kuat tekan beton besar.
2. Butiran tajam, keras, awet (durable) dan tidak bereaksi dengan material beton lainnya.
3. Berat jenis agregat tinggi yang berarti agregat padat sehingga beton yang dihasilkan padat dan awet.
4. Gradasi sesuai spesifikasi dan hindari gap graded aggregate karena akan membutuhkan semen lebih banyak untuk mengisi rongga.
5. Bentuk yang baik adalah bulat, karena akan saling mengisi rongga dan jika ada bentuk yang pipih dan lonjong dibatasi maksimal 15% berat total agregat.

Pemeriksaan agregat halus perlu dilakukan untuk mengetahui sifat dan karakteristik bahan yang akan digunakan dan juga dilakukan untuk mengetahui apakah agregat halus ini memenuhi persyaratan atau tidak. Hasil pemeriksaan ini juga dapat digunakan sebagai data rencana adukan beton yang akan digunakan dalam pembuatan PB. Pemeriksaan agregat halus meliputi:

1. **Kadar Lumpur**
Pengujian kandungan lumpur bertujuan untuk mengetahui kadar lumpur dalam pasir. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5%. Yang dimaksud lumpur adalah bagian yang lolos saringan 200 mm. Apabila kadar lumpur melampaui 5% maka agregat halus harus dicuci.
2. **Berat Jenis Agregat Halus**
Pengujian berat jenis agregat halus dimaksudkan sebagai pegangan dalam pengujian untuk menentukan berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), berat jenis semu dan angka penyerapan air dalam agregat halus/pasir.
3. **Gradasi Pasir atau Modulus Halus Butir Agregat**
Gradasi pasir adalah distribusi ukuran butir pasir. Bila butir-butir pasir mempunyai ukuran yang sama (seragam) volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukurannya bervariasi akan terjadi volume pori yang kecil. Hal ini karena butiran yang kecil mengisi pori diantara butiran yang lebih besar, sehingga pori-porinya menjadi lebih sedikit, dengan kata lain kemampatannya tinggi.

1.2.2.5 Refractory Brick

Refractory Brick/Batu Bata Tahan Api adalah material inorganik natural maupun sintesis, tahan terhadap temperatur yang lebih besar dari 1500°C tanpa terjadinya perubahan bentuk ataupun peleburan akibat tingginya suhu yang dikenainya. Syarat dari batu bata tahan api ini ialah mampu mempertahankan bentuk dan kekuatan pada temperatur yang tinggi serta dalam berbagai kondisi. Tujuan dari penggunaan batu bata tahan api ini ialah untuk menahan laju perpindahan panas di dalam tungku pembakaran dapur (furnace) ke luar.

A. Beberapa sifat dari Refractory Brick yang diperlukan ialah sebagai berikut:

1. Tahan terhadap suhu tinggi
2. Tahan terhadap perubahan suhu yang mendadak
3. Tahan terhadap lelehan terak logam, kaca, dan gas panas
4. Tahan terhadap beban dan gaya abrasi
5. Menghemat panas
6. Memiliki koefisien ekspansi panas yang rendah
7. Tidak boleh mencemari bahan yang bersinggungan

B. Beberapa sifat fisik dari batu bata tahan api ini sebagai berikut.

1. Titik leleh
2. Porositas
3. Kekuatan terhadap panas dan dingin
4. Ekspansi Thermal
5. Konduktivitas panas
6. Sintering Temperature
7. Susut

Menurut ketahanannya terhadap temperatur pembagian dari Refractory Brick, yaitu sebagai berikut.

1. Refractory biasa (1580°C – 1770°C)
2. Refractory tinggi (1780°C – 2000°C)
3. Refractory super (>2000°C)

Adapun beberapa jenis Refractory sebagai berikut:

Tabel 2. Jenis Refractory

Acid	Basic	Neutral	Special
<i>Fire brick</i>	<i>Magnesite</i>	<i>Chromite</i>	<i>Pure alumina</i>
<i>Semi silika</i>	<i>Dolomite</i>	<i>Carbon</i>	<i>Zirconthoria</i>
<i>Silika</i>	<i>Chrome Magnesite</i>	<i>Grafit</i>	<i>Spinel</i>
	<i>Forsterite</i>	<i>Silicon Carbide</i>	<i>Boran nitride</i>

Refraktori netral yang paling umum adalah alumina dan kromia. Produksi refraktori Chromia telah menurun selama dekade terakhir karena masalah lingkungan dengan pembentukan kromium heksavalen. Oleh karena itu, refraktori alumina adalah bahan netral yang paling tersedia. Bahan-bahan ini digunakan secara luas oleh industri logam karena suhu lelehnya yang tinggi, harga sedang, dan kemampuan untuk digunakan dalam lingkungan asam dan basa (H. Fang, 1998).

Tabel 3. Bahan Baku Refraktori Jenis Netral

Bauxite	-Campuran antara diaspor e (α -AlO.OH), gibbsite {Al(OH)3 } dan boechmit (AlO.OH). -Hasil pelapukan dan leaching silika dari batuan yang kaya alumina (granit, syenit).
Corundum / Alumina	-Formula Al ₂ O ₃ -Kadar Al ₂ O ₃ 88 – 99% -Titik lebur 1850 – 2050 °C -Merupakan mineral tambahan pada batuan metamorf (mica-schist, gneiss)
Carbon	-Coke, Anthracite, Bituminous, Graphite, Charcoal -Titik lebur 2000 – 2990 °C -Termal ekspansi rendah -Ketahanan terhadap suhu kejut bagus -Tidak mudah terbasahi oleh cairan besi
Silicon Carbide	-SiC (85-99 %) -Titik lebur 1730 – 2000 °C -Ketahanan terhadap suhu kejut bagus -Kekuatan pada suhu tinggi bagus

1.2.2.6 Air

Salah satu bahan penting pembuatan beton adalah air. Air sangat diperlukan pada saat pembuatan beton untuk membantu memicu reaksi kimia pada semen, air berfungsi membasahi agregat sehingga memberikan kemudahan dalam pekerjaan. Oleh karena itu, air sangat diperlukan untuk memulai reaksi pada semen, serta sebagai bahan pelumas antar butir-butir pada agregat agar mudah dikerjakan dan dipadatkan.

Air diperlukan pada pembuatan PB untuk memicu proses kimiawi kapur, membasahi agregat dan memberikan kemudahan dalam pekerjaan PB. Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang terlalu sedikit akan menyebabkan proses proses hidrasi tidak tercapai seluruhnya sehingga akan mempengaruhi kekuatan beton.

Air yang dapat diminum pada umumnya bisa digunakan sebagai campuran. Air yang digunakan sebagai campuran haruslah bersih, tidak boleh mengandung minyak, asam, alkali, zat organik atau bahan lainnya yang dapat merusak struktur pada PB. Dan bila dipakai dalam campuran PB akan menurunkan kualitas pada PB.. Pemakaian air untuk beton sebaiknya memenuhi persyaratan (PBI 1971)

1. Tidak mengandung Lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gr/liter.
2. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gr/liter
3. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gr/liter
4. Tidak mengandung senyawa-senyawa sulfat lebih dari 1 gr/liter.

1.2.3 Pengujian Kuat Tekan

Menurut SNI 1974-2011, kuat tekan (f'_c) beton mengacu pada besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton runtuh ketika dikenai gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh suatu tekan. Nilai kuat tekan beton dapat dihitung dengan membagi beban maksimum yang dipikul benda uji selama pengujian dengan luas penampang rata-rata yang ditentukan.

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan :

f'_c	=	Kuat tekan beton (MPa atau N/mm ²)
P	=	Gaya tekan aksial (N)
A	=	Luas penampang melintang benda uji (mm ²)

Kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kuat tekan beton merupakan sifat terpenting dalam kualitas beton disbanding dengan sifat-sifat lain.

1.2.4 Porositas Beton

Porositas beton merupakan suatu perbandingan volume void (pori) terhadap volume total dari beton (Sutapa A.G, 2011). Porositas berhubungan erat dengan permeabilitas pada beton. Tingginya tingkat kepadatan beton berpengaruh terhadap besarnya kuat tekan pada beton. Semakin besar nilai porositas beton, maka kuat tekan betonnya semakin kecil. Pengujian porositas dilakukan dengan tujuan untuk menentukan metode yang sederhana dan efektif untuk menentukan densitas dan porositas keseluruhan sampel (Ahmet A, 2021). Pengujian porositas mengacu pada ASTM C 642-97, metode ini sebagai standar untuk memnetukan densitas dan isi rongga dari benda uji.

$$P=(B-C)/(B-A) \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

- P = Porositas
- A = Berat sampel dalam air (gram)
- B = Berat sampel kondisi SSD (gram)
- C = Berat sampel kering oven (gram)

1.2.5 Penyerapan Air PB

Daya serap air PB adalah persentase berat air yang mampu diserap melalui pori-pori oleh PB. Hasil ini bisa didapatkan dengan membandingkan berat PB kering dan basah (setelah perendaman didalam air). Berat PB kering didapatkan dari pengovenan benda uji pada suhu $\pm 105^{\circ}\text{C}$ dalam waktu 24 jam.

Dari percobaan maka didapatkan berat basah dan berat kering PB sehingga daya serap air dapat dicari berdasarkan SNI 03-0691-1996 seperti pada persamaan berikut:

$$\text{Penyerapan Air} = (A-B)/B \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan :

- A = berat bata beton basah
- B = berat bata betonkering

1.2.6 Kuat lentur

Kuat lentur adalah salah satu parameter penting dalam menentukan kekuatan material terhadap beban lentur atau tekanan yang diberikan pada bagian tengah saat kedua ujungnya ditopang. Pada material seperti PB, pengujian kuat lentur dilakukan untuk mengetahui ketahanannya terhadap beban yang diterapkan di lapangan, khususnya beban kendaraan dan pejalan kaki. Kuat lentur juga sangat dipengaruhi oleh kualitas material dan metode produksi yang digunakan dalam pembuatan PB.

Rumus dasar kuat lentur pada material yang ditopang di kedua ujungnya adalah:

$$f = M * c / I$$

- f adalah tegangan lentur
- M adalah momen lentur yang diterapkan,
- C adalah jarak dari sumbu netral ke titik terluar material, dan
- I adalah momen inersia.

1.2.6.1 Faktor yang mempengaruhi kuat lentur PB

Beberapa faktor utama yang memengaruhi kuat lentur PB adalah:

1. Kualitas Material: Komposisi bahan, seperti kualitas semen, pasir, dan agregat, sangat memengaruhi kekuatan PB. Campuran yang ideal harus memiliki komposisi yang tepat untuk mencapai kepadatan dan kekuatan maksimum.
2. Kepadatan dan Porositas: Semakin padat suatu PB, biasanya semakin tinggi kekuatannya. Porositas yang rendah mengurangi kelemahan material terhadap tekanan dan meningkatkan daya tahan terhadap cuaca.
3. Metode Pembuatan: Teknik cetak (pressing) atau vibrasi juga memiliki peranan dalam menentukan kepadatan dan konsistensi PB. PB yang diproduksi dengan metode cetak tekan memiliki kepadatan yang lebih baik dibandingkan dengan yang hanya menggunakan metode cetak biasa.
4. Kondisi Pengeringan dan Perawatan (Curing): Setelah proses pencetakan, PB perlu menjalani proses perawatan (curing) yang tepat. Curing membantu meningkatkan kekuatan material melalui proses hidrasi semen yang optimal.

1.2.6.2 Standar pengujian kuat lentur

Pengujian kuat lentur PB mengikuti standar tertentu, seperti SNI 03-0691-1996 atau ASTM C293 untuk beton, guna memastikan hasil pengujian yang konsisten dan valid. Standar ini biasanya mencakup:

1. Persiapan Spesimen: PB dipersiapkan dengan dimensi standar sesuai ketentuan pengujian.
2. Pengaturan Beban: Beban diberikan secara bertahap pada titik tengah spesimen dengan dua titik penopang di kedua ujungnya.
3. Prosedur Pengujian: Pengujian dilakukan dengan menggunakan mesin uji lentur, dan beban diterapkan hingga terjadi keretakan atau patahan pada spesimen.
4. Perhitungan Kuat Lentur: Nilai kuat lentur dihitung berdasarkan hasil pembebanan dengan rumus yang sesuai.

1.2.7 Analisis SEM

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah teknik analisis yang digunakan untuk mempelajari morfologi dan struktur permukaan material dengan perbesaran tinggi. SEM menggunakan elektron sebagai sumber pencitraan, yang memberikan resolusi tinggi serta kemampuan untuk menganalisis komposisi elemen di

permukaan sampel. SEM banyak digunakan dalam penelitian material, biologi, farmasi, dan berbagai bidang ilmu lainnya.

1.2.7.1 Prinsip kerja SEM

Dalam proses SEM, berkas elektron ditembakkan ke permukaan sampel dan menyebabkan interaksi antara elektron dan atom pada permukaan tersebut. Interaksi ini menghasilkan berbagai sinyal, seperti elektron sekunder dan elektron balik (backscattered), yang digunakan untuk membentuk gambar beresolusi tinggi dari permukaan sampel. Sinyal lain yang dihasilkan, seperti sinar-X karakteristik, memungkinkan identifikasi komposisi elemen sampel melalui analisis EDX (Energy Dispersive X-ray).

1.2.7.2 Persiapan sampel

Persiapan sampel untuk SEM tergantung pada jenis bahan yang akan dianalisis. Sampel padat umumnya dapat ditempatkan langsung ke dalam ruang SEM, tetapi bahan non-konduktif perlu dilapisi dengan lapisan tipis logam (seperti emas atau karbon) untuk mencegah pengisian muatan. Lapisan ini membantu dalam memperoleh gambar yang jelas dengan mengurangi efek distorsi yang dihasilkan oleh elektron yang terperangkap di permukaan bahan non-konduktif.

1.2.7.3 Prosuder pengujian SEM

1. Persiapan sampel: Bersihkan dan, jika perlu, lapisi sampel dengan bahan konduktif.
2. Penempatan sampel: Tempatkan sampel pada stage SEM dan pastikan posisinya stabil.
3. Pengaturan parameter: Atur tegangan akselerasi elektron, jarak kerja, dan parameter lainnya sesuai kebutuhan.
4. Pengambilan gambar: Ambil gambar pada perbesaran yang diinginkan, dengan memperhatikan morfologi dan komposisi material.
5. Analisis komposisi: Gunakan detektor EDX untuk analisis komposisi elemen, jika diperlukan.

Data yang diperoleh dari SEM berupa citra resolusi tinggi yang menggambarkan topografi permukaan sampel. Analisis citra dilakukan untuk mengidentifikasi morfologi, ukuran partikel, dan distribusi material. Jika dilakukan analisis EDX, spektrum sinar-X dapat memberikan informasi tentang komposisi elemen yang terdapat pada sampel, yang berguna untuk karakterisasi kimiawi bahan.

1.2.7.4 Kelebihan dan kekurangan SEM

A. Kelebihan

1. Resolusi tinggi yang memungkinkan observasi detail dari struktur mikro.
2. Kemampuan untuk melakukan analisis elemen melalui EDX.

B. Kekurangan

1. Persiapan sampel yang memakan waktu, terutama untuk bahan non-konduktif
2. Tidak cocok untuk analisis bahan biologis hidup, karena SEM bekerja dalam ruang vakum.

1.2.8 Abrasi Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angeles

Keausan (wear) adalah proses hilangnya lapisan permukaan suatu benda akibat gesekan antar permukaannya. Dengan menggunakan prosedur keausan agregat kasar, metode pengujian ini menggunakan 75 mm (3 inci) sampai dengan ukuran 2.36 mm (saringan No.8) dengan menggunakan mesin abrasi Los Angeles (SNI 2417:2008).

1.2.8.1 Jenis-jenis keausan dan penyebabnya :

Keausan mekanis di terbagi 4, yaitu:

- a. Abrasive wear
Keausan akibat permukaan lunak terpotong oleh permukaan kasar dan keras, sehingga kehilangan material pada permukaan lunak.
- b. Adhesive wear
Permukaan lunak yang bergesekan dengan permukaan keras menyebabkan keausan ini.
- c. Flow wear
Saat permukaan lunak meleleh dan bergerak sebagai respons terhadap kontak dengan benda lain, keausan seperti ini terjadi.
- d. Fatigue wear
Permukaan benda yang terkena beban berulang-ulang akan menjadi aus dan akibatnya retak.

1.2.8.2 Hal-hal yang terjadi selama proses keausan, yaitu:

- a. Teori sliding contact
Akibat gesekan permukaan benda yang bersentuhan. Semua benda bergesek, termasuk udara, air, dan benda padat. Gesekan dapat menyebabkan benda padat dengan permukaan licin aus.
- b. Teori rolling contact
Dapat terjadi dengan atau tanpa gesekan; dalam kasus terakhir, hanya ada perubahan sudut dan tidak ada perpindahan.
- c. Teori sliding-rolling contact
Keadaan dimana terjadi gesekan antara dua benda akibat putaran dan beban.

1.2.8.3 Pembagian Gradasi

Pembagian ini di buat karena adanya perbedaan ukuran tiap butiran agregat, sehingga dibagi menjadi 8, yaitu

- Gradasi A
Agregat yang lolos pada saringan 11/2 in dan tertahan pada saringan 3/8 in dan contoh massa agregat yang diambil sebanyak 5000 gram dan bola baja digunakan sebanyak 12 biji dengan jumlah putaran pada mesin abrasi los angeles yaitu 500 putaran.
- Gradasi B
Agregat yang lolos pada saringan 3/4 in dan tertahan pada saringan 3/8 in dan contoh massa agregat yang diambil sebanyak 5000 gram dan bola baja digunakan sebanyak 11 biji dengan jumlah putaran pada mesin abrasi los angeles yaitu 500 putaran.
- Gradasi C
Agregat yang lolos pada saringan 3/8 in dan tertahan pada saringan No. 4 dan contoh massa agregat yang diambil sebanyak 5000 gram dan bola baja digunakan sebanyak 8 biji dengan jumlah putaran pada mesin abrasi los angeles yaitu 500 putaran.
- Gradasi D
Agregat yang lolos pada saringan 1/4 in dan tertahan pada saringan No. 8 dan contoh massa agregat yang diambil sebanyak 5000 gram dan bola baja digunakan sebanyak 6 biji dengan jumlah putaran pada mesin abrasi los angeles yaitu 500 putaran.
- Gradasi E
Agregat yang lolos pada saringan 3 in dan tertahan pada saringan 1 1/2 in dan contoh massa agregat yang diambil sebanyak 10000 gram dan bola baja digunakan sebanyak 12 biji dengan jumlah putaran pada mesin abrasi los angeles yaitu 1000 putaran.
- Gradasi F
Agregat yang lolos pada saringan 2 in dan tertahan pada saringan 1 in dan contoh massa agregat yang diambil sebanyak 10000 gram dan bola baja digunakan sebanyak 12 biji dengan jumlah putaran pada mesin abrasi los angeles yaitu 1000 putaran
- Gradasi G
Agregat yang lolos pada saringan 11/2 in dan tertahan pada saringan 3/4 in dan contoh massa agregat yang diambil sebanyak 10000 gram dan bola baja digunakan sebanyak 12 biji dengan jumlah putaran pada mesin abrasi los angeles yaitu 1000 putaran.

Untuk menghitung hasil pengujian, berdasarkan SNI 2417:2008 maka menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Keausan} = (A-B)/A \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan :

A = berat benda uji semula, dinyatakan dalam gram

B = berat benda uji tertahan saringan No.12, dinyatakan dalam gram.

1.2.9 Desain Konseptual

Pada penelitian ini, limbah batu bata tahan api tipe magnesita diidentifikasi sebagai bahan alternatif yang berpotensi untuk menggantikan pasir dalam pembuatan PB. Pemanfaatan limbah batu bata tahan api tidak hanya bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dari limbah industri tetapi juga untuk menambah nilai ekonomis bahan tersebut. PT Vale Indonesia Tbk sebagai penghasil utama limbah ini, menghadirkan potensi inovasi dalam bidang konstruksi yang ramah lingkungan, dengan mengolah limbah batu bata tahan api menjadi bahan penyusun PB. Hal ini diharapkan mampu memberikan solusi ekonomis dan lingkungan melalui pengurangan penggunaan pasir alami dan pengelolaan limbah industri secara efektif.

Dalam konteks material komposit, penggunaan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti pasir diharapkan dapat meningkatkan performa mekanik dari PB, terutama dalam hal ketahanan terhadap tekanan, porositas, dan abrasi. Penggunaan material refraktori tipe magnesita, yang memiliki ketahanan tinggi terhadap suhu dan sifat mekanik yang kuat, diharapkan dapat meningkatkan daya tahan dan kekuatan PB. Sebagai bahan bangunan yang umum digunakan pada trotoar, jalan setapak, dan area parkir, PB yang lebih kuat dan tahan lama akan memberikan keuntungan dalam penggunaan jangka panjang dan mengurangi biaya perawatan.

Penelitian ini akan menguji berbagai aspek kinerja PB yang menggunakan limbah batu bata tahan api dengan memvariasikan proporsi substitusi pasir menjadi 15%, 30%, 50%, dan 100%. Setiap variasi proporsi ini akan diuji untuk melihat pengaruhnya terhadap kekuatan tekan, penyerapan air, durabilitas, dan porositas PB. Pengujian ini meliputi pengukuran sifat mekanik seperti kuat tekan dan lentur, serta analisis mikrostruktur menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) untuk mengamati distribusi pori-pori dan potensi retakan mikro. Dengan metode ini, diharapkan dapat diperoleh proporsi optimal penggunaan limbah batu bata tahan api yang memberikan kinerja terbaik pada PB.

Desain konseptual ini memadukan prinsip keberlanjutan dengan inovasi material konstruksi, di mana pemanfaatan limbah industri dapat menjadi solusi untuk masalah lingkungan sekaligus memenuhi kebutuhan akan material bangunan berkinerja tinggi. PB hasil substitusi limbah batu bata tahan api diharapkan dapat memenuhi standar nasional kualitas PB, seperti ketahanan terhadap tekanan, serapan air rendah, dan ketahanan abrasi. Melalui pendekatan ini, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan material PB yang ramah lingkungan, tetapi juga pada upaya pelestarian sumber daya alam dengan mengurangi ketergantungan pada pasir sebagai bahan konstruksi utama.\

1.2.10 Penelitian Terdahulu

Djamaluddin, A.R., Caronge, M.A., Tjaronge, M.W., Lando, A.T., Irmawaty, R., 2020. Evaluation of sustainable concrete PBs incorporating processed waste tea ash. Studi ini menyimpulkan bahwa penggunaan PWTA sebagai pengganti semen dalam PB dapat mengurangi emisi CO₂ dan biaya produksi, menjadikannya solusi yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis. Penelitian ini mendukung pemanfaatan limbah abu teh sebagai alternatif pengganti semen, meskipun hanya dalam aplikasi tertentu seperti taman dan trotoar yang tidak memerlukan daya tahan tinggi. Penggunaan PWTA tidak hanya bermanfaat untuk pengurangan emisi karbon dari produksi semen, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari pembuangan limbah abu teh di tempat pembuangan akhir. Paper ini membahas pengaruh penggunaan limbah bata tanah liat sebagai agregat halus dalam beton daur ulang. Kajian ini mengeksplorasi berbagai rasio penggantian agregat alami dengan limbah bata (WCBF) dalam proporsi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%, serta menambahkan variasi volume air tambahan.

Aboutaleb, D., Safi, B., Chahour, K., Belaid, A., 2017. Use of refractory bricks as sand replacement in self-compacting mortar. Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan limbah batu bata tahan api sebagai pengganti pasir pada mortar pengecoran mandiri (self-compacting mortar/SCM). Batu bata tahan api yang dihancurkan digunakan sebagai agregat halus dalam berbagai proporsi substitusi pasir (0%, 10%, 30%, 50%, dan 100%) dalam SCM. Studi ini mengukur sifat fisik dan mekanik mortar, seperti kepadatan, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur, baik dalam kondisi segar maupun setelah proses pengeringan. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan batu bata tahan api dapat mempertahankan karakteristik dasar mortar, meskipun terjadi sedikit penurunan fluiditas dan kekuatan tekan ketika substitusi mencapai 100%. Namun, sifat fisik seperti kepadatan tetap stabil pada semua variasi proporsi. Secara keseluruhan, penggunaan batu bata tahan api sebagai pengganti pasir dalam SCM memberikan beberapa manfaat lingkungan, seperti pengurangan penggunaan pasir alami dan pengelolaan limbah industri. Mortar dengan komposisi 100% batu bata tahan api sebagai pengganti pasir mampu mencapai kekuatan tekan hingga 35 MPa, yang cukup kuat untuk kebutuhan konstruksi. Studi ini menunjukkan potensi batu bata tahan api sebagai bahan agregat alternatif yang ramah lingkungan, berdaya guna, dan berkelanjutan tanpa mengorbankan kualitas fisik dari material bangunan tersebut.

Wang, X., Li, X., Lian, L., Jia, X., Qian, J., 2023. Recycling of waste magnesite refractory brick powder in preparing magnesium phosphate cement mortar: Hydration activity, mechanical properties and long-term performance. Penggunaan kembali magnesite refractory bricks (MRBs) bekas dalam bentuk magnesium phosphate cement mortar (MPCM) menghadirkan solusi inovatif untuk pengelolaan limbah industri sekaligus mengurangi biaya produksi bahan konstruksi. Penelitian ini berfokus pada ekstraksi dan pemanfaatan kembali kandungan magnesite dari MRBs yang diolah menjadi MPCM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan

magnesia daur ulang (RM) dapat memperpanjang waktu pengaturan mortar serta menurunkan suhu hidrasi. Pengaturan ini sangat menguntungkan untuk proyek-proyek konstruksi skala besar karena memungkinkan waktu tambahan untuk penyesuaian dan pemeriksaan kualitas. Selain itu, performa mekanik MPCM yang dibuat dari RM mencapai kekuatan kompresi optimal dengan rasio magnesia-fosfat (M/P) pada angka 4. Pada rasio ini, kekuatan kompresi mencapai 39,1 MPa dalam waktu 3 jam dan 68,5 MPa setelah 28 hari, yang memenuhi standar kekuatan awal dan jangka panjang yang dibutuhkan dalam material perbaikan konstruksi. Meski performanya sedikit lebih rendah dibandingkan dengan MPCM berbasis dead-burned magnesia (DM), penggunaan RM tetap mampu mempertahankan stabilitas volume serta ketahanan terhadap air yang baik. Hal ini menjadikan RM sebagai alternatif yang layak dan lebih ekonomis dibandingkan DM. Integrasi MRBs daur ulang ini juga memberikan dampak positif terhadap lingkungan. Dengan mengurangi pembuangan MRBs ke landfill dan memanfaatkan limbah industri sebagai bahan dasar konstruksi, pendekatan ini mendukung ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah yang berkelanjutan. Di masa depan, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memperbaiki kualitas RM dengan menghilangkan kotoran atau kontaminan dari MRBs bekas agar hasil akhir MPCM semakin optimal. Dengan demikian, pengembangan MPCM berbasis RM dapat menjadi solusi konstruktif bagi industri untuk berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan dan ekonomi.

Viranthy Dian Pertiwi, A., Caronge, M.A., Tjaronge, M.W., 2024. Producing Eco-Friendly Concrete PB Using Waste Refractory Brick Aggregates. Penelitian ini membahas penggunaan limbah bata tahan api sebagai alternatif pengganti pasir alami untuk produksi PB beton ramah lingkungan. Tujuan utama penelitian ini adalah mengkaji efektivitas limbah bata tahan api dalam memperbaiki kualitas PB beton yang ramah lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan limbah bata tahan api dapat meningkatkan kekuatan tekan, densitas, dan ketahanan aus pada PB. Hal ini terutama disebabkan oleh adanya partikel halus dari bata tahan api yang menyebabkan reaksi pozzolanic, yang meningkatkan kepadatan dan ketahanan struktur beton. Selain aspek teknis, penelitian ini juga menyoroti aspek ekonomi dari penggunaan limbah bata tahan api. Penggunaan 100% limbah bata tahan api sebagai pengganti pasir alami menghasilkan penghematan biaya material dan produksi sebesar 19,75 \$/m³ dan 10,41 \$/m³. Penghematan biaya ini disebabkan oleh harga limbah bata yang lebih rendah dibandingkan dengan pasir alami, yang tentunya memberikan keuntungan ekonomi tambahan dalam produksi PB. Kesimpulannya, penelitian ini menemukan bahwa PB yang diproduksi dengan 100% limbah bata tahan api tidak hanya memenuhi standar teknis untuk aplikasi non-lalu lintas, tetapi juga menawarkan manfaat ekonomi yang signifikan. Dengan demikian, penggunaan limbah bata tahan api sebagai pengganti agregat pasir alami dapat dianggap sebagai solusi berkelanjutan yang mendukung pengurangan limbah konstruksi dan konservasi sumber daya alam.

Farooq, M.U., Hameed, R., Tahir, M., Sohail, M.G., Shahzad, S., 2023. Mechanical and durability performance of 100% recycled aggregate concrete pavers made by compression casting. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah Konstruksi dan Pembongkaran (Construction and Demolition - C&D) sebagai agregat beton daur ulang (Recycled Concrete Aggregates - RCA) memiliki potensi besar dalam pengembangan infrastruktur berkelanjutan, terutama untuk produksi paving beton berkekuatan tinggi. Dengan menggunakan teknik Compression Casting Technique (CCT), penelitian ini berhasil menghasilkan paving beton yang 100% terbuat dari RCA dan memenuhi persyaratan kekuatan minimum yang diperlukan untuk aplikasi struktural. Hal ini menjadi bukti bahwa RCA dapat menggantikan agregat alami sepenuhnya tanpa mengorbankan kualitas maupun ketahanan, sekaligus mendukung konsep ekonomi sirkular dalam konstruksi. Untuk mencapai kekuatan tekan 35 MPa dalam 7 hari (atau 55 MPa dalam 28 hari), campuran optimal yang digunakan terdiri dari 60% agregat halus dan 40% agregat kasar, dengan kandungan semen 15–20% dan tekanan pengecoran sebesar 20 MPa. Pengujian terhadap sifat mekanik seperti kekuatan tekan dan lentur, serta ketahanan terhadap pengaruh lingkungan (penyusutan kering, penyerapan air, dan ketahanan terhadap serangan garam dan asam), menunjukkan bahwa paving beton RCA memenuhi standar internasional dan lokal, termasuk yang ditetapkan oleh GB, IS, ASTM, dan spesifikasi lokal di NHA dan AJK. Hasil ini membuktikan bahwa paving RCA memiliki ketahanan yang cukup untuk aplikasi di lingkungan ekstrem. Keberhasilan CCT dalam meningkatkan sifat mekanik paving RCA juga menjadi temuan penting dalam penelitian ini. Teknik ini mampu meningkatkan kekuatan tekan yang sangat penting untuk ketahanan di lingkungan dengan kadar garam tinggi. Meskipun paving RCA memiliki penyerapan air maksimum sebesar 6,34% yang masih dalam batas wajar, penyusutan keringnya lebih tinggi dibandingkan dengan paving beton agregat alami (Natural Aggregate Concrete - NAC). Sifat berpori dari RCA tampaknya berkontribusi terhadap fenomena ini, namun tidak mengurangi performa keseluruhan yang signifikan. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa pembuatan paving beton berkekuatan tinggi dengan menggunakan 100% RCA melalui teknik CCT adalah metode yang layak dan berkelanjutan. Dengan formula regresi yang dikembangkan, penelitian ini menyediakan alat prediksi untuk kekuatan tekan paving berbasis RCA di masa mendatang. Temuan ini membuka peluang lebih lanjut dalam aplikasi beton daur ulang di berbagai sektor konstruksi, memberikan solusi yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga ekonomis dalam memenuhi permintaan infrastruktur berkelanjutan

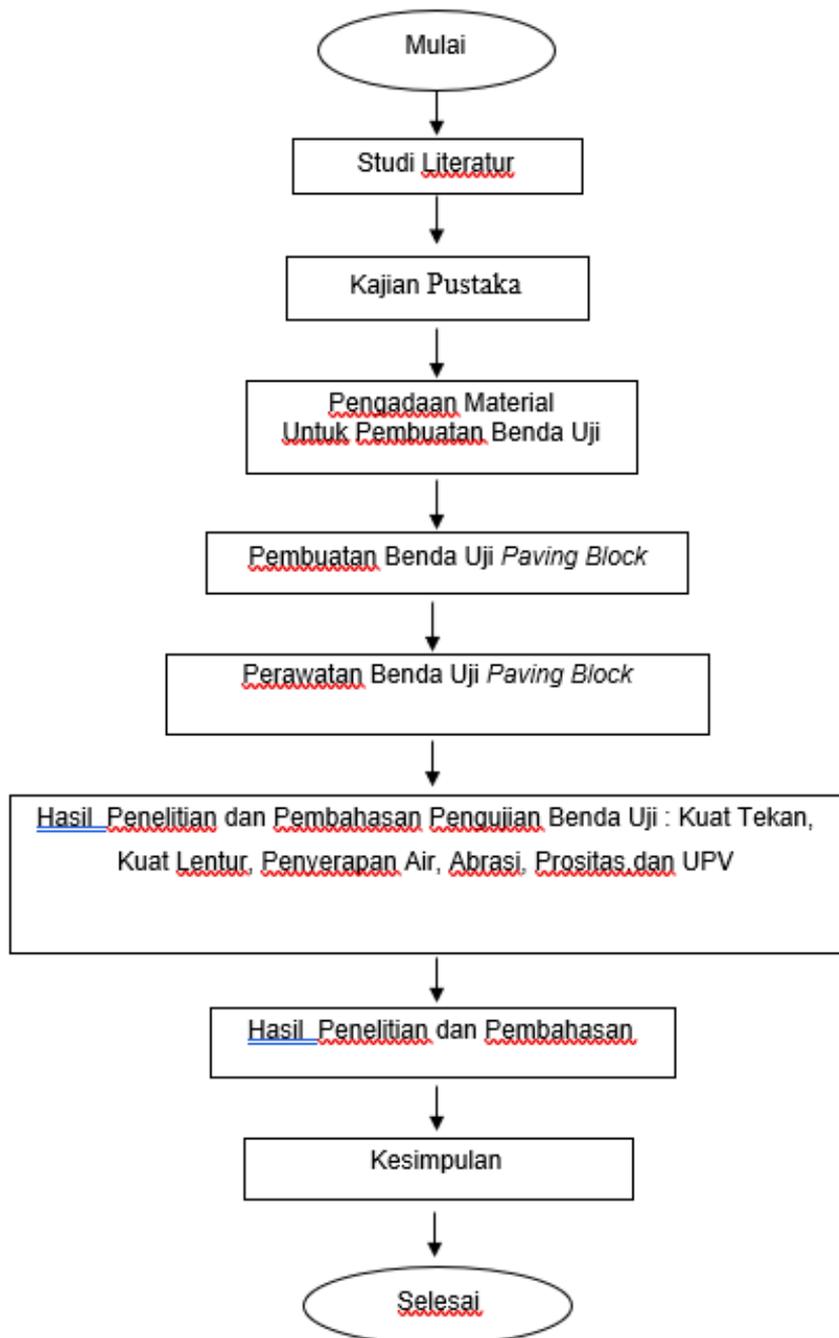
BAB II METODE PENELITIAN

2.1. Metode 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 upv, kuat tekan, penyerapan air, berat jenis pada PB umur 28 hari.
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.

Tahap penelitian ini dapat dilihat secara sistematis dalam bentuk diagram alir pada gambar berikut ini.



Gambar 2. Diagram Alur 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 2023.

2.3. Jenis dan Sumber Penelitian

Penelitian ini melakukan beberapa pengujian di laboratorium, berupa pengujian kuat tekan, pengujian kuat lentur, penyerapan air, pengujian UPV pada PB, Porositas, Abrasi, dan Analisis SEM. Untuk mendapatkan data, maka digunakan dua metode pengumpulan data yaitu:

- a. Studi Pustaka, untuk mendapatkan data sekunder dilakukan dengan membaca sejumlah buku-buku, jurnal-jurnal ataupun artikel ilmiah sebagai landasan teori dalam penelitian ini.
- b. Pengujian sampel di laboratorium, untuk mendapatkan data yang kemudian digunakan untuk menganalisa hasil dari penelitian ini.

2.4. Pemeriksaan Karakteristik Semen

Pemeriksaan karakteristik semen digunakan metode Standar Nasional Indonesia 2049 : 2015 untuk pemeriksaan Semen Portland. Spesifikasi pemeriksaan karakteristik semen yang digunakan dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 4. Standar Pengujian Karakteristik Semen Portland (SNI 2049 :2015)

No	Nama Percobaan	Interval	Standar Rujukan
1	Berat Jenis Semen	3,0 – 3,2	SNI 2049 : 2015

2.5. Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Timbangan digital
2. Mesin pencampur bahan beton (*mixer*)
3. *Concrete Vibrator*
4. Cetakan PB ukuran 20 cm x 10 cm x 6 cm
5. *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*
6. Cetok (Sendok Beton) dan Talam
7. Oven suhu 50°C dan oven 150 °C
8. UTM (*Universal Testing Machine*)
9. *Stopwatch*

10. Load Cell kapasitas 500 kN untuk mengukur dan verifikasi beban tekan
11. Data Logger dan Satu Set Komputer

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yang terdiri dari:

1. *Refractory Bricks* (Batu Bata Tahan Api) yang mengandung magnesia yang berasal dari PT. Vale Indonesia Tbk.
2. Semen Portland Komposit (*Portland Composite Cement, PCC*).
3. Agregat halus, yaitu pasir yang berasal dari PT. Vale Indonesia Tbk.
4. Abu Batu
5. Air yang digunakan adalah air bersih.



Gambar 3. *Refractory Brick* tipe magnesia



Gambar 4. Agregat halus



Gambar 5. Air tawar

2.6. Desain Benda Uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk persegi panjang dengan

Panjang 20 cm, Lebar 10 cm dan Tinggi 6 cm. Dilakukan pembuatan benda uji meliputi PB normal dan PB penambahan limbah bata tahan api sebanyak 15%, 30% 50% dan 100% terhadap pasir. Masing-masing variasi benda uji terdapat 5 sampel benda uji. Untuk memudahkan dalam penelitian maka benda uji diberi kode tertentu. Kode tersebut terdiri dari beberapa variasi yang penambahan limbah bata tahan api disingkat seperti 15 RBC , 30 RBC , 50 RBC ,100 RBC dan seterusnya sampai masing-masing 5 variasi, sedangkan untuk PB Normal kode variasinya yaitu Normal 1, Normal 2 dan seterusnya sampai 5 sampel.

Tabel 5. Mix desain PB

Mix code	Semen	Pasir	RBC	CS	w/c
C	1	2	0	4	
15RBC	1	1.7	0.3	4	0.211
30RBC	1	1.4	0.6	4	
50RBC	1	1	1	4	
100RBC	1	0	2	4	

Tabel 6. Variasi Benda Uji PB

Nama Sampel	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tinggi (cm)	Jumlah Variasi
Normal	20	10	6	5
15 RBC	20	10	6	5
30 RBC	20	10	6	5
50 RBC	20	10	6	5
100 RBC	20	10	6	5



Gambar 6. Benda Uji

2.7. Pembuatan Benda Uji

Pembuatan dan pengujian ini dirancang untuk mengetahui pengaruh kinerja PB pengaruh kinerja PB dengan limbah batu bata tahan api tipe magnesita sebagai pengganti pasir terhadap kuat tekan dan penyerapan air dengan menggunakan cetakan persegi panjang dengan ukuran 20 cm x 10 cm x 6 cm. Metode pencampuran yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Menyiapkan material dengan komposisi campuran yang telah ditentukan;
2. Refractory brick, abu batu, semen, dan agregat halus dimasukkan ke dalam mixer sesuai variasi sampel yang akan dibuat;
3. Mengaduk material menggunakan mixer selama 1 menit;
4. Memasukkan air sedikit demi sedikit secara merata;
5. 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.
6. Selanjutnya campuran dimasukkan kembali dibenda uji sampai full kemudian diratakan sebanyak 25 kali tumbukan kembali, lalu benda uji divibrator kembali selama 10 detik.
7. Mengeluarkan benda uji dari cetakan, kemudian benda uji diletakkan ditempat yang dapat dilakukan perawatan selama 28 hari.





Gambar 7. Pembuatan Benda Uji

2.8. Pengujian Benda Uji

2.8.1 Pengukuran berat satuan kering

Pengukuran berat satuan kering bertujuan untuk menilai kepadatan material yang merupakan aspek penting dalam menentukan kualitas dan kekuatan PB. Berat satuan kering adalah berat per satuan volume dari beton yang telah dikeringkan, yang menunjukkan seberapa padat material tersebut. Dalam uji ini, sampel PB yang telah dibuat dan diawetkan selama periode waktu tertentu (biasanya 28 hari) dibiarkan mengering.

Proses pengujian ini dilakukan dengan menimbang massa sampel PB yang sudah kering lalu mengukur volume total dari material tersebut. Nilai berat satuan kering dihitung dengan membagi massa dengan volume. Nilai ini akan menunjukkan apakah substitusi RBC pada beton berdampak terhadap kepadatan beton, yang pada akhirnya mempengaruhi kekuatan mekanik dari PB itu sendiri.

2.8.2 Uji Kuat Tekan Paving Block

Pengujian kuat tekan merupakan salah satu pengujian terpenting dalam evaluasi material beton, yang dilakukan untuk mengetahui ketahanan PB terhadap gaya tekan. Kuat tekan adalah kemampuan beton untuk menahan beban atau tekanan tanpa mengalami kerusakan. Uji ini sangat penting karena PB pada aplikasi nyata akan menerima beban berat baik dari kendaraan maupun dari elemen lainnya. Untuk melakukan uji ini, sampel PB dipersiapkan dalam bentuk kubus atau silinder standar. Sampel tersebut kemudian diletakkan di mesin uji tekan, di mana tekanan secara bertahap diberikan hingga sampel mengalami kerusakan atau runtuh. Nilai kuat tekan diperoleh dengan membagi beban maksimum yang diterima sampel dengan luas permukaan yang menerima tekanan. Pengujian ini penting untuk menentukan proporsi optimal RBC yang memberikan kuat tekan terbaik, sehingga PB memiliki ketahanan.



Gambar 8. Pengujian Kuat Tekan Paving Blok

2.8.3 Uji Penyerapan Air PB

Pengujian penyerapan air dilakukan untuk mengetahui daya serap dan tingkat porositas dari PB yang dipengaruhi oleh keberadaan RBC. Semakin tinggi tingkat penyerapan air, semakin besar porositas material, yang dapat mengindikasikan kerentanan terhadap retakan dan penurunan kualitas. PB yang memiliki penyerapan air yang terlalu tinggi dapat mengalami masalah dalam aplikasi pada lingkungan terbuka, Terutama dalam kondisi hujan atau kelembaban tinggi.

Prosedur uji ini dimulai dengan menimbang sampel PB yang kering. Setelah itu, sampel direndam dalam air selama 24 jam untuk memastikan bahwa seluruh pori-pori dalam PB terisi air. Setelah perendaman, sampel diangkat dan ditimbang dalam kondisi basah. Perbedaan antara berat sampel kering dan berat setelah perendaman digunakan untuk menghitung persentase penyerapan air PB. Hasil ini penting untuk memahami kualitas dan kinerja PB yang mengandung RBC dalam lingkungan basah atau kondisi lembab.



Gambar 9. Pengujian Penyerapan Air Paving Block

2.8.4 Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dilakukan berdasarkan SNI ASTM C597:2012 tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui PB. Pengujian UPV menggunakan alat *Ultrasonic Pulse Velocity Proceq Pundit Lab+*. Tujuan dari pengujian ini ialah untuk mengetahui kecepatan rambat gelombang dari PB. Setiap variasi terdapat 5 sampel yang akan diuji dengan metode direct. Sehingga nilai kecepatan rambat gelombang yang diambil ialah nilai kecepatan rata-rata dari tiap sampel pada setiap variasi.

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 memasang transducer penerima dan penguat (*Amplifier*)
3. Memasang gemuk pada ujung sampel yang akan diletakkan transducer
4. Memulai pembacaan kecepatan rambat gelombang pada alat
5. Mencatat hasil kecepatan rambat gelombang dari alat.



Gambar 10. Pengujian UPV Paving Block

2.8.5 Pengujian Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angeles

Ketahanan abrasi adalah sifat material untuk menahan keausan akibat gesekan. Pengujian ini penting untuk PB yang akan digunakan di area lalu lintas atau tempat yang sering terkena gesekan. Ketahanan abrasi mempengaruhi umur pemakaian material, terutama dalam lingkungan yang banyak pergerakan atau paparan elemen eksternal.

Proses uji ini menggunakan mesin pengujian abrasi yang memberikan gesekan konstan pada permukaan PB. Sampel diuji dengan menempatkan beban atau gaya pada permukaannya sambil memberikan gerakan berulang-ulang. Setelah periode pengujian selesai, PB diukur untuk mengetahui penurunan berat akibat abrasi. Hasil uji ini menentukan apakah substitusi RBC meningkatkan ketahanan material terhadap keausan, yang sangat penting untuk penggunaan jangka panjang.

Tabel 5 Syarat Mutu Pada Sifat Fisik Ketahanan Aus *Paving Bloc*

MUTU	KETAHANAN AUS (MPa)	
	Rata-rata	Min.
A	0,090	3
B	0,130	6
C	0,160	8
D	0,219	10



Gambar 11. Pengujian Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angeles

2.8.6 Analisis Pengujian SEM

Analisis Struktur Mikro dengan Scanning Electron Microscope (SEM) dilakukan untuk mengamati struktur internal dan distribusi partikel dalam PB secara mendetail. Dengan analisis ini, dapat terlihat adanya pori, retakan mikro, dan ikatan antara partikel yang mempengaruhi kekuatan ketahanan material. SEM memberikan gambaran pada skala mikroskopik untuk memastikan kualitas dan

kepadatan ikatan partikel dalam PB. Proses ini melibatkan pemindaian sampel dengan sinar elektron untuk mendapatkan citra dengan perbesaran tinggi. Hasil pemindaian menunjukkan detail struktur permukaan dan distribusi pori di dalam material. SEM dapat mengidentifikasi kelemahan pada mikrostruktur material, seperti pori besar atau retakan kecil yang tidak terlihat pada pengujian makroskopik. Analisis ini sangat bermanfaat dalam memahami bagaimana RBC memengaruhi kinerja material PB dari sudut pandang mikrostruktur.

2.8.7 Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur dilakukan untuk mengukur ketahanan PB terhadap gaya lentur atau tekukan. Kuat lentur merupakan salah satu parameter penting dalam menilai daya tahan material terhadap deformasi atau perubahan bentuk akibat beban lentur, yang relevan terutama pada PB yang digunakan dalam area yang menerima tekanan dari berbagai arah. Dalam uji ini, sampel PB yang berbentuk balok diletakkan pada mesin uji lentur. Tekanan diberikan di tengah balok sambil kedua sisi lainnya disangga, sehingga terjadi momen lentur di titik tengah. Beban diberikan hingga terjadi patahan pada balok, dan kuat lentur dihitung berdasarkan besarnya beban yang menyebabkan patahan. Pengujian ini memberikan informasi penting terkait penambahan RBC pada campuran beton, apakah mampu memberikan peningkatan atau penurunan pada daya tahan lentur PB