

**EKSPLORASI EFEK DARI FLY ASH PADA KINERJA PAVING BLOCK
BERKELANJUTAN**

**EXPLORATION OF THE EFFECTS OF FLY ASH ON SUSTAINABLE
PAVING BLOCK PERFORMANCE**



RIKHWANUL DWISETYA RAMDI

D012231011



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

**EKSPLORASI EFEK DARI FLY ASH PADA KINERJA PAVING BLOCK
BERKELANJUTAN**

**RIKHWANUL DWISETYA RAMDI
D012231011**



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

**EXPLORATION OF THE EFFECTS OF FLY ASH ON SUSTAINABLE
PAVING BLOCK PERFORMANCE**

**RIKHWANUL DWISETYA RAMDI
D012231011**



**CIVIL ENGINEERING MASTER STUDY PROGRAM
FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PENGAJUAN TESIS

**EKSPLORASI EFEK DARI FLY ASH PADA KINERJA PAVING BLOCK
BERKELANJUTAN**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

RIKHWANUL DWISETYA RAMDI

D012231011

Kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2024

TESIS

EKSPLORASI EFEK DARI FLY ASH PADA KINERJA PAVING BLOCK BERKELANJUTAN

RIKHWANUL DWISETYA RAMDI
D012231011

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 14 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 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

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul "EKSPLOKORASI EFEK DARI FLY ASH PADA KINERJA PAVING BLOCK BERKELANJUTAN" adalah benar karya saya dengan arahan dari tim pembimbing (Dr.Eng. M. Akbar Caronge, ST, MEng Pembimbing Utama dan Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST, MEng sebagai Pembimbing Pendamping). 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 disubmid dan ter under review di Jurnal (Journal of Building Pathology and Rehabilitation, Submission ID: f00b7310-76ed-45b8-bac8-6e60938f8a7a) sebagai artikel dengan judul "*Experimental Investigation on Compressive Strength and Environmental Performance of Paving Blocks using Fly Ash as a Substitute for Cement and Sand*". Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

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

Makassar, 02 Desember 2024



Rikhwanul Dwisetya Ramdi
D012231011

UCAPAN TERIMA KASIH

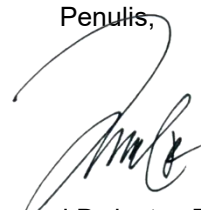
Penelitian yang saya lakukan dapat terlaksana dengan sukses dan tesis ini dapat terampungkan atas bimbingan, diskusi dan arahan Dr.Eng. M. Akbar Caronge, ST, MEng Pembimbing Utama dan Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, ST, MEng sebagai Pembimbing Pendamping. Saya mengucapkan berlimpah terima kasih kepada mereka. Penghargaan yang tinggi juga saya sampaikan kepada Bapak yang telah mengizinkan kami untuk melaksanakan penelitian di lapangan, dan kepada Prof. Dr. Eng. Ir. Rudy Djamaluddin, ST, M. Eng atas kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Ucapan terima kasih juga saya ucapkan kepada pimpinan Universitas Hasanuddin dan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh Magister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta saya mengucapkan limpah terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan motivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada seluruh keluarga atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Gowa, 29 November 2024

Penulis,



Rikhwaniul Dwisetia Ramdi

ABSTRAK

RIKHWANUL DWISETYA RAMDI. **Eksplorasi Efek Dari Fly Ash Pada Kinerja Paving Block Berkelanjutan** (dibimbing oleh Dr.Eng. M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

Penelitian ini mengeksplorasi pemanfaatan fly ash (FA) sebagai substitusi sebagian semen dan pasir dalam produksi paving block untuk meningkatkan kinerja dan keberlanjutannya. Paving block dibuat dengan variasi persentase FA (0%, 20%, dan 30%) dan diuji sifat mekanik (kuat tekan, Penyerapan Air, dan UPV) serta dampak lingkungannya. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan signifikan pada kuat tekan, ketahanan aus, dan modulus elastisitas dengan penambahan FA hingga 20%. Selain itu, penggunaan FA juga memperbaiki karakteristik penyerapan air dan sifat mekanik lainnya. Analisis dampak lingkungan mengungkapkan pengurangan emisi CO₂, penipisan abiotik, penipisan ozon, pembentukan ozon fotokimia, pengasaman, dan eutrofikasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa fly ash merupakan bahan yang berpotensi tinggi untuk meningkatkan kinerja dan keberlanjutan paving block, serta mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Kata Kunci: Fly ash, Paving block, Kuat tekan, Penyerapan air, Dampak lingkungan, Keberlanjutan.

ABSTRACT

RIKHWANUL DWISETYA RAMDI. **Exploration of the Effects of Fly Ash on Sustainable Paving Block Performance** (guided by Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

This study explores the use of fly ash (FA) as a partial substitute for cement and sand in paving block production to improve its performance and sustainability. Paving blocks were made with varying percentages of FA (0%, 20%, and 30%) and tested for mechanical properties (compressive strength, Water absorption, modulus of elasticity) and their environmental impacts. The results showed a significant increase in compressive strength, wear resistance, and modulus of elasticity with the addition of FA up to 20%. In addition, the use of FA also improved water absorption characteristics and other mechanical properties. Environmental impact analysis revealed reductions in CO₂ emissions, abiotic depletion, ozone depletion, photochemical ozone formation, acidification, and eutrophication. This study concluded that fly ash is a material with high potential to improve the performance and sustainability of paving blocks, as well as reduce negative impacts on the environment.

Keywords: fly ash, paving block, compressive strength, wear resistance, environmental impact, sustainability.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN JUDUL BERBAHASA ASING.....	iii
PENGAJUAN TESIS.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR ISTILAH.....	xvi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	xvii
CURRICULUM VITAE.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	20
1.1. Latar Belakang.....	20
1.2. Rumusan Masalah.....	22
1.3. Tujuan Penelitian	22
1.4. Manfaat Penelitian	23
1.5. Ruang Lingkup Penelitian	23
1.6. Paving Block.....	23
1.6.1. Kelebihan Paving Block.....	24
1.6.2. Kelemahan <i>Paving Block</i>	24
1.6.3. Syarat Mutu <i>Paving Block</i>	25
1.6.4. Dimensi dan Bentuk <i>Paving Block</i>	25
1.6.5. Klasifikasi	26
1.7. Material Penyusun Paving Block	26
1.7.1. Semen <i>Portland</i> (PC)	26
1.7.2. Agregat Halus.....	26
1.7.3. Abu Batu Pecah.....	27
1.7.4. Air.....	27
1.7.5. Abu Terbang (fly ash)	28
1.8. Penyerapan Air Pada Paving Block	29

1.9.	Kuat Tekan.....	29
1.10.	Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).....	30
1.11.	Energy Consumption	Error! Bookmark not defined.
1.12.	Parameter Dampak Lingkungan	Error! Bookmark not defined.
1.13.	Desain Konseptual.....	34
1.14.	Penelitian Terdahulu	37
BAB II	METODE.....	40
2.1.	Tempat dan Waktu Penelitian	40
2.2.	Metode Penelitian	40
2.3.	Desain Benda Uji	41
2.4.	Analisa Rancangan Campuran (Mix Design).....	43
2.5.	Pembuatan Benda Uji.....	43
2.6.	Pengujian Benda Uji	44
2.6.1.	Kuat Tekan Paving Block.....	44
2.6.2.	Pengujian Penyerapan Air Paving Block	45
2.6.3.	Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	46
2.6.4.	<i>Environment Performance</i> dari <i>Paving Block</i>	47
BAB III	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	49
3.1.	Hasil Pengujian Penyerapan Air	49
3.2.	Hasil Pengujian Kuat Tekan.....	50
3.3.1.	Pengaruh Fly Ash Terhadap Kuat Tekan <i>paving block</i>	50
3.3.2.	Perilaku Tegangan Regangan Kuat Tekan <i>paving block</i>	51
3.3.3.	Toughness index.....	52
3.3.4.	Modulus elastisitas	53
3.3.	Hasil Pengujian Ultrasonic Pulse velocity (UPV)	54
3.4.1.	Gelombang UPV.....	54
3.4.2.	Effect fly ash terhadap UPV.....	55
3.4.3.	Hubungan Kuat tekan terhadap nilai UPV	56
3.4.	Environmental Impact	57
3.5.1.	Dampak lingkungan dalam 1 m ³ campuran fungsional unit.....	57
3.5.2.	Pengaruh jumlah FA terhadap Performance global warming potential dibagi nilai Kuat tekan	58

3.5.3. Pengaruh jumlah FA terhadap Performance Abiotic depletion potential dibagi nilai kuat tekan.....	60
3.5.4. Pengaruh jumlah FA terhadap Performance ozone depletion potential dibagi nilai kuat tekan.....	61
3.5.5. Pengaruh jumlah FA terhadap Performance photochemical ozone creation potential dibagi nilai kuat tekan	62
3.5.6. Pengaruh jumlah FA terhadap Performance acidification potential dibagi nilai kuat tekan	63
3.5.7. Pengaruh jumlah FA terhadap Performance eutrophication potential dibagi nilai kuat tekan	64
BAB IV KESIMPULAN.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....	67
L A M P I R A N.....	76

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Sifat-sifat fisik (SNI 03-0691-1996).....	25
Tabel 2. Data dampak lingkungan dari produksi bahan paving block.....	34
Tabel 3. Benda Uji <i>Paving Block</i>	42
Tabel 4. Syarat Mutu Pada Sifat Fisik Kuat Tekan <i>Paving Block</i>	44
Tabel 5. Syarat Mutu Pada Sifat Fisik Penyerapan Air <i>Paving Block</i>	46
Tabel 6. Dampak Lingkungan dalam 1m ³ campuran fungsional unit	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Definisi Toughness index.....	30
Gambar 2. Skematik pengujian <i>ultrasonik pulse velocity</i> (UPV)	32
Gambar 3. Kerangka Konseptual.....	36
Gambar 4. Diagram Alir Penelitian	41
Gambar 5. Pembuatan Benda Uji.....	42
Gambar 6. Mix Dsign	43
Gambar 7. Pengujian Kuat Tekan <i>Paving Block</i>	45
Gambar 8. Pengujian Penyerapan Air <i>Paving Block</i>	46
Gambar 9. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity <i>Paving Blok</i>	47
Gambar 10. Penyerapan Air <i>Paving Block</i>	50
Gambar 11. Pengaruh fly ash terhadap kuat tekan	51
Gambar 12. (a) stress strain 28 hari, (b) Normalized stress 28 hari, (c) Stress strain 90 hari, (d) Normalized Stress 90 hari.....	52
Gambar 13. Toughness index.....	53
Gambar 14. Modulus Elastisitas	54
Gambar 15. (a) waveform CBFA-0 28 hari, (b) waveform CBFA-0 90 hari, (c) waveform CBFA-20 28 hari, (d) waveform CBFA-20 90 hari, (e) waveform CBFA-30 28 hari, dan (f) waveform CBFA-30 90 hari	55
Gambar 16. Effect fly ash terhadap UPV.....	56
Gambar 17. Effect fly ash terhadap kuat tekan dan UPV.....	57
Gambar 18. Dampak Lingkungan.....	58
Gambar 19. Performance Global Warming Potential dibagi Nilai kuat tekan akibat penggunaan fly ash	59
Gambar 20. Performance Abiotic depletion potential dibagi nilai kuat tekan akibat penggunaan fly ash	61
Gambar 21. Performance ozone depletion potential dibagi nilai kuat tekan akibat penggunaan fly ash	62
Gambar 22. Performance photochemical ozone creation potential dibagi nilai kuat tekan akibat penggunaan fly ash.....	63
Gambar 23. Performance acidification potential dibagi nilai kuat tekan akibat penggunaan fly ash.....	64
Gambar 24. Performance eutrophication potential dibagi nilai kuat tekan akibat penggunaan fly ash	65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Documentasi Pembuatan Benda Uji.....	77
Lampiran 2 Documentasi Penimbangan Benda Uji.....	78
Lampiran 3. Documentasi Pengujian Penyerapan Air	79
Lampiran 4. Documentasi Pengujian Kuat Tekan.....	80
Lampiran 5. Documentasi Pengujian UPV	81

DAFTAR ISTILAH

Istilah	Arti dan Penjelasan
Fly ash	adalah salah satu hasil sampingan dari pembakaran batu bara. Lebih tepatnya, fly ash merupakan partikel halus yang terbang ke atas bersama gas buang selama proses pembakaran batu bara di boiler.
Paving block beton	adalah material bangunan yang terbuat dari campuran semen, air, dan agregat (pasir dan batu) yang dicetak dalam berbagai bentuk dan ukuran, lalu dipadatkan.
Kuat tekan Beton	adalah kemampuan beton untuk menahan beban atau tekanan yang diberikan sebelum beton tersebut hancur.
abiotic depletion potential	adalah ukuran yang digunakan untuk menilai dampak lingkungan dari ekstraksi sumber daya, khususnya yang berfokus pada penipisan sumber daya tak terbarukan seperti mineral dan bahan bakar fosil.
global warming potential	adalah ukuran seberapa banyak panas yang dapat diserap oleh suatu gas rumah kaca di atmosfer selama periode waktu tertentu, dibandingkan dengan karbon dioksida (CO ₂).
ozon depletion potential	adalah ukuran yang menunjukkan potensi suatu zat untuk merusak lapisan ozon, relatif terhadap zat referensi, yaitu CFC-11 (Trichlorofluoromethane).
photochemical ozone creation potential	adalah ukuran yang menunjukkan kemampuan suatu senyawa organik volatil (VOC) untuk membentuk ozon di permukaan tanah, relatif terhadap senyawa referensi, yaitu etena.
acidification potential	adalah ukuran yang menunjukkan potensi suatu zat untuk menyebabkan pengasaman lingkungan, relatif terhadap zat referensi, yaitu sulfur dioksida (SO ₂).
eutrophication potential	adalah ukuran yang menunjukkan potensi suatu zat untuk menyebabkan eutrofikasi di lingkungan perairan, relatif terhadap zat referensi, yaitu fosfat (PO ₄).
Semen Portland	adalah jenis semen yang paling umum digunakan di seluruh dunia sebagai bahan dasar beton, mortar, plester, dan adukan non-spesialisasi. Semen ini dikembangkan dari jenis lain kapur hidraulis di Britania Raya pada pertengahan abad ke-19, dan biasanya berasal dari batu kapur.

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Singkatan/symbol	Arti dan keterangan
CB	= Paving block beton
FA	= Fly ash
CBFA-0	= paving block beton mengintegrasika fly ash 0%
CBFA-20	= paving block beton mengintegrasika fly ash 20%
CBFA-30	= paving block beton mengintegrasika fly ash 30%
f'_c	= kuat tekan beton (MPa atau N/mm ²)
P	= gaya tekan aksial dari mesin tekan (N)
A	= luas penampang melintang benda uji (mm ²)
PLTU	= Pembangkit listrik tenaga uap
ADP	= abiotic depletion potential
GWP	= global warming potential
ODP	= ozon depletion potential
POCP	= photochemical ozone creation potential
AP	= acidification potential
EP	= eutrophication potential
PC	= Semen Portland
B	= berat paving block beton kering
LVDT	= Linear variable differential transformer
E	= modulus elastisitas (GPa)
σ	= nilai tegangan stress (MPa)
ε	= regangan (mm/mm)
ε_0	= regangan prediksi (mm/mm)
Wi	= berat per unit volume komponen penyusun beton (kg/m ³)
Ki	= energy consumption untuk setiap komponen penyusun beton (Mj/kg)
UTM	= <i>universal testing machine</i>
E	= dampak lingkungan
Ni	= standar dampak lingkungan
Wi	= berat kategori (kg/m ³)
UPV	= Ultrasonic pulse velocity
SNI	= standar nasional indonesia

ASTM	= <i>american society for testing and materials</i>
C – S – H	= kalsium silikat hidrat
NRT	= non-destructive test

CURRICULUM VITAE

A. Data Pribadi

1. Nama : Rikhwanul Dwisetya Ramdi
2. Tempat, tgl. lahir : Watampone, 23 Maret 1998
3. Alamat : Perumahan Bumi Findaria Mas, Moncongloe, Maros
4. Kewarganegaraan : Warga Negara Indonesia

B. Riwayat Pendidikan

1. Tamat SLTA tahun 2016 di SMAN 2 Watampone
2. Sarjana (S1) tahun 2021 di Universitas Negeri Makassar

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini PLTU batubara masih berfungsi sebagai infrastruktur ketenagalistrikan yang andal untuk menjamin pasokan listrik nasional dan mendorong kemandirian energi. Pertumbuhan abu terbang dan abu dasar sangat didorong oleh penggunaan batubara pada PLTU yang masih terus berlangsung, yang volumenya tetap konsisten dan cenderung meningkat. Endapan abu dasar dan abu terbang memberikan dampak buruk terhadap keanekaragaman hayati dan estetika lingkungan. Berdasarkan hasil penelitian Singh et al (Singh et al. 2016), pembuangan abu terbang dapat menimbulkan pencemaran air tanah dan air permukaan dimana unsur Mg, Zn, Cu dan Co berada di bawah batas baku mutu air minum dan unsur Cr, Pb, Ni dan Fe telah melampaui batas baku mutu.

Oleh karena itu sangat penting bagi insinyur manajemen konstruksi dan material technologist untuk memperoleh dan mengembangkan pengetahuan akademik dan empirik tentang pengelolaan pemanfaatan FA (fly ash) dan BA (bottom ash) secara efektif sebagai bahan baku alternatif dalam konstruksi, alih-alih bergantung pada pasir dan kerikil alam yang ditambang dari sungai. Akhir-akhir ini, ada permintaan yang meningkat di masyarakat untuk menggunakan bahan sintetis inovatif yang berasal dari produk sampingan. Meskipun demikian, modifikasi ini memerlukan sejumlah besar pekerjaan dan pemahaman yang mendalam tentang prinsip-prinsip ilmiah terkait dampak lingkungan penggunaan by product seperti abu terbang dan BA.(Vairakannu 2017)(Nayak et al. 2022a)

Paving block merupakan salah satu elemen penting dalam konstruksi perkerasan jalan dan trotoar (Badan Standardisasi Nasional 1996). Kualitas dan performa paving block sangat dipengaruhi oleh karakteristik material penyusunnya, termasuk kuat tekan, penyerapan air, modulus elastisitas, dan ketahanan terhadap aus (Hamza et al. 2024). Dalam upaya meningkatkan kualitas dan keberlanjutan paving block, penggunaan bahan alternatif seperti FA sebagai pengganti sebagian semen dan pasir telah menjadi

fokus penelitian yang menjanjikan (Leiva et al. 2024),(G. Wang et al. 2023). FA, limbah industri dari pembakaran batubara, memiliki potensi sebagai pozzolan yang dapat meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton (Qu et al. 2024)(da Silva Magalhães, Cezar, and Lustosa 2023)(Parhizkar et al. 2023). Pemanfaatan fly ash dalam produksi paving block tidak hanya memberikan manfaat dari segi teknis, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan. Penggunaan fly ash sebagai bahan substitusi dapat mengurangi kebutuhan akan semen, yang produksinya menghasilkan emisi karbon dioksida yang signifikan (Mahdi et al. 2022)(Jonbi and Fulazzaky 2020)(Jitendra and Khed 2020). Selain itu, pemanfaatan limbah industri seperti fly ash juga sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular yang mendorong penggunaan kembali dan daur ulang by products.

Agregat merupakan material utama yang menempati 60–85% volume CBn, sehingga karakteristik CB segar dan beton keras dipengaruhi oleh sifat agregat [4][5]. Sebagian besar material berbasis semen seperti beton, mortar dan CB ini diproduksi dengan menggunakan agregat alam yang menyebabkan terjadinya penambangan pasir dan batuan alam yang masif sehingga akan mengganggu ekosistem. Mengurangi penggunaan material alam dengan memanfaatkan material alternatif atau limbah sebagai bahan beton dapat mengurangi dampak lingkungan (Islam, Meherier, and Islam 2016; Islam and Shahjalal 2021; S. B. Kim et al. 2010).

Secara global, material konstruksi yang paling banyak digunakan setelah air adalah semen portland yang menyumbang sekitar 5% emisi CO₂ antropogenik (Gartner 2012). Tingginya emisi CO₂ yang terjadi dalam proses produksi semen membutuhkan usaha-usaha intensif untuk menurunkan emisi tersebut yang salah satu diantaranya adalah mengurangi penggunaan semen dengan menggantikannya dengan by product seperti FA. Terkait pembuatan material konstruksi seperti CB dampak lingkungan harus diperhitungkan sebagai bagian dari pertimbangan jangka panjang dan sustainabilitas. (Müller, Haist, and Vogel 2014) Müller et al, membahas potensi beton keberlanjutan dengan menekankan pentingnya mengukur efek kerusakan dan dampak perubahan yang dipicu proses konstruksi serta bahan bangunan terhadap keberlanjutan struktur yang dibangun. Pengaruh signifikan dari pelaksanaan pekerjaan yang buruk terhadap masa pakai dan potensi keberlanjutan, meskipun tidak menyebabkan penurunan dampak lingkungan. Langkah-langkah strategis untuk menurunkan dampak lingkungan adalah mendaur ulang FA dengan memasukkan byproduct menjadi bahan bangunan. Menurut Ohemeng (Ohemeng and Naghizadeh 2023) ADP, GWP, ODP, POCP, AP, dan EP merupakan parameter penting untuk mengevaluasi kinerja lingkungan beton. Sejumlah penelitian (Kurda, Silvestre, and de Brito 2018; Rajib Kumar Majhi and Nayak 2020; Ohemeng and Naghizadeh 2023) (Kurda et al., 2018; Majhi & Nayak, 2020; Ohemeng & Naghizadeh, 2023) digunakan sebagai dasar untuk mengadopsi berbagai elemen lingkungan yang dipertimbangkan adalah abiotic depletion potential (ADP), global warming potential (GWP), ozone

depletion potential (ODP), photochemical ozone creation potential (POCP), acidification potential (AP), and eutrophication potential (EP). Abbe (2017) (Abbe and Hamilton 2017) Kim et al (T. Kim, Tae, and Chae 2016) membahas global warming adalah kenaikan suhu bumi karena emisi Gas Rumah Kaca (GHG), dengan CO₂ sebagai standar GWP. Peningkatan suhu global berpengaruh buruk pada ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material, yang memicu perubahan iklim seperti kenaikan permukaan laut dan penyebaran penyakit. GWP adalah ukuran dampak potensial emisi gas CO₂ terhadap pemanasan global. ADP (Abiotic Depletion Potential) merujuk pada penurunan sumber daya alam tak terbarukan, seperti mineral dan bahan bakar fosil, akibat ekstraksi. Ekstraksi yang tidak proporsional mengurangi kapasitas alami bumi dan memicu kelangkaan unsur tertentu, berdampak pada keseimbangan lingkungan dan ketersediaan sumber daya untuk generasi mendatang. ODP (ozone depletion potential) adalah proses pengurangan konsentrasi lapisan ozon stratosfer (terletak pada ketinggian 15-30 km) yang dipicu kontaminan buatan manusia. Konsekuensinya adalah tingkat radiasi ultraviolet lebih tinggi, yang dapat memperbesar jumlah melanoma. POCP (photochemical ozone creation potential) merujuk pada dampak dari polutan buatan manusia di udara bereaksi dengan sinar matahari menghasilkan zat kimia seperti ozon. Polutan ini mengakibatkan terbentuknya kabut asap yang mengandung senyawa kimia berbahaya bagi ekosistem, serta berbahaya bagi kesehatan manusia dan pertumbuhan tanaman. AP (Acidification Potential) merujuk pada dampak dari deposisi polutan asam seperti SO₂ dan NO_x pada tanah, air, dan ekosistem. Polutan ini dapat merusak ekosistem, mengubah sifat fisik zat, dan meningkatkan mobilisasi logam berat dalam tanah. Akibatnya, rantai makanan hewan dan tumbuhan akuatik dan terestrial dapat terganggu. SO₂ adalah substansi standar untuk menilai AP. EP

Menggunakan abu terbang sebagai pengganti agregat halus dan semen untuk produksi *paving block* adalah salah satu cara untuk mengurangi limbah dan mencapai beton ramah lingkungan. Serta melihat pengaruh dari pemanfaatan abu terbang dalam pembuatan beton dari segi kinerja dan sifat mekanik maka penulis mengangkat judul **“Eksplorasi Efek Dari Fly Ash Pada Kinerja Paving Block Berkelanjutan”**.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang maka, permasalahan yang ingin diselesaikan dirumuskan sebagai berikut: parameter dampak lingkungan

1. Masalah perilaku kuat tekan *paving block* yang menggunakan abu terbang sebagai pengganti semen dan agregat halus.
2. Masalah parameter dampak lingkungan daur ulang limbah abu terbang sebagai pengganti semen dan agregat halus .

1.3. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis perilaku kuat tekan *paving block* yang menggunakan abu terbang sebagai pengganti semen dan agregat halus.
2. Menganalisa parameter dampak lingkungan terhadap daur ulang limbah abu terbang sebagai pengganti semen dan agregat halus.

1.4. Manfaat Penelitian

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan wawasan yang berkaitan dengan perilaku mekanik *paving block* dengan limbah abu terbang sebagai pengganti pasir dan semen serta untuk memperoleh informasi perbandingan tentang jumlah emisi rumah kaca yang dihasilkan dari *paving block* dengan limbah abu terbang sebagai pengganti pasir dan semen. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mengurangi material alami dalam *paving block* dengan memanfaatkan kembali limbah abu terbang sebagai pengganti pasir dan semen.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Berikut adalah ruang lingkup penelitian dalam penulisan tesis ini, yakni sebagai berikut :

1. *Fly Ash* (abu terbang) yang digunakan merupakan abu terbang rendah kalium (kelas F)
2. Memanfaatkan pedoman yang ada sebagai acuan adalah SNI 03-0691-1996 dan beberapa jurnal terdahulu.
3. Pada penelitian ini semen yang digunakan adalah tipe semen Portland komposit (PCC) dan memenuhi standar SNI-2049_2015.
4. Bentuk dari benda uji adalah persegi dengan ukuran = 20 x 10 x 8 cm.
5. Jumlah benda uji yang direncanakan 4 variasi masing-masing terdiri dari 15 benda uji.

1.6. Paving Block

Bata Beton (*paving block*) merupakan salah satu komposisi bahan bangunan yang terbuat dari campuran semen Portland atau adhesive hidrolik serupa, air dan agregat, dengan atau tanpa bahan lain yang tidak mengurangi kualitas bata beton tersebut. (SNI 03_0691-1996).

Bata beton (*paving block*) dengan nilai penyerapan rendah (%) dan nilai resistensi tinggi (MPa) dianggap berkualitas baik. Jenis karakteristik kualitas yang sehubungan dengan standar kualitas ini lebih besar untuk kekuatan pers dan lebih kecil untuk persentase penyerapan air. *Paving block* berkualitas rendah (kelas D) memiliki kekuatan dorong minimum 8,5 MPa dan persentase penyerapan air rata-rata maksimal 10% menurut SNI 03-0691-1996.

Paving block memiliki estetika yang baik karena, selain menjadi persegi atau dengan berbagai bentuk, mereka juga dapat diberi warna sesuai dengan kebutuhan, *paving block* itu sendiri cocok untuk lantai luar bangunan yang banyak

digunakan dilalu lintas dan dimaksudkan untuk tidak sempurna dan bebas dari retakan.

Di Indonesia, *paving block* telah dikenal dan digunakan sejak 1977 atau 1978. *Paving block* itu sendiri dating dalam berbagai bentuk untuk sesuai dengan preferensi pengguna. *Paving block* dapat digunakan untuk berbagai alasan, seperti area parker, terminal, jalan paving, dan blok jalan di kompleks perumahan, tergantung pada kebutuhan. *Paving block* adalah sampingan dari bahan bangunan berbasis semen yang digunakan untuk mengeraskan atau menutupi permukaan tanah ali-alih melukisnya.

1.6.1. Kelebihan Paving Block

Bata Beton (*paving block*), yang memiliki banyak manfaat, dapat menggantikan plat beton dan aspal. *Paving block* berguna untuk berbagai tempat, seperti taman bermain, taman kota, terminal bus, tempat parker, dan area pejalan kaki. Ada banyak manfaat untuk menggunakan *paving block*, diantaranya :

1. Dapat diproduksi dalam jumlah besar.
2. Dapat digunakan dalam pembangunan jalan tanpa membutuhkan keterampilan khusus.
3. *Paving block* dapat digunakan secara teratur tanpa mudah rusak
4. *Paving block* lebih mudah untuk diletakkan dan dapat digunakan segera tanpa harus menunggu mereka untuk mengeras, seperti dengan beton.
5. Tidak membuat kebisingan dan membuat debu.
6. Keberadaan pori-pori pada *paving block* mengurangi aliran permukaan dan meningkatkan aliran air ke tanah.
7. Perkerasan dengan *paving block* mampu menurunkan hidrokarbon dan menahan logam berat.
8. *Paving block* memiliki daya tarik visual yang berbeda terutama ketika dibuat dengan pola dan warna yang menarik.
9. Harga *paving block* lebih rendah bila dibandingkan dengan perkerasan konvensional lainnya.
10. Biaya perawatan murah dan proses pemasangan mudah.

1.6.2. Kelemahan Paving Block

Kelemahan dari *paving block* adalah sebagai berikut :

1. *Paving block* memerlukan perawatan rutin untuk menjaga keindahan dan fungsionalitasnya.
2. *Paving block* rentan terhadap retak akibat tekanan berlebih, suhu ekstrem, atau penempatan yang tidak tepat.
3. Celah-celah antara *paving block* dapat menjadi tempat tumbuhnya rumput dan gulma, yang memerlukan perawatan ekstra untuk menjaganya tetap bersih.

4. Jika *paving block* tidak dipasang dengan benar atau diletakkan diatas tanah yang tidak stabil, ada risiko mereka bisa bergeser atau miring dari posisi awalnya.

1.6.3. Syarat Mutu *Paving Block*

Beberapa factor yang harus diperhitungkan dalam menentukan mutu *paving block* dimana harus memenuhi persyaratan SNI 03-0691-1996 diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Sifat Tampak
Paving block terbentuk dengan baik dan harus bebas dari retakan atau kerusakan sudut dan pinggul tidak mudah rusak dengan tangan.
2. Bentuk dan Ukuran
Desain dan dimensi *paving block* untuk lantai ditentukan oleh kesepakatan antara pengguna dan produsen. Produsen akan menjelaskan desain, ukuran, dan struktur penempatan *paving block*.
3. Sifat Fisik
Paving block harus memiliki kekuatan fisik, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1 di bawah ini.

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

1.6.4. Dimensi dan Bentuk *Paving Block*

Paving block dengan bentuk dan ketebalan yang berbeda banyak tersedia di pasaran. Biasanya, ukuran *paving block* bisa antara 200 dan 250 mm dalam panjang, dan lebar dapat berkisar dari 100 hingga 112 mm. panjang beam ini bervariasi dari 60 hingga 100 mm. *paving block* sendiri tersedia dalam bentuk

holand dan bentuk heksagon dengan ketebalah yang dapat disesuaikan untuk memenuhi persyaratan tertentu. Dengan pertumbuhan kebutuhan pasar menyebabkan bertambahnya varietas dan gaya baru.

1.6.5. Klasifikasi

Ada beberapa jenis klasifikasi dalam paving block, antara lain:

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

1.7. Material Penyusun Paving Block

Material yang digunakan pada *paving block* pada umumnya yakni semen *Portland* (PC), agregat halus dan air.

1.7.1. Semen *Portland* (PC)

Semen *portland* didefinisikan sebagai jenis semen hidrolis yang dibuat dengan menggiling klinker yang terbuat dari silikat kalsium hydraulic, biasanya dengan satu atau lebih bentuk kalsiumsulfat ditambahkan ke dalamnya, dicampur dengan komponen utamanya. Tujuan utama dari semen adalah untuk menghubungkan partikel agregat bersama-sama untuk menciptakan struktur padat dan menempati ruang kosong antara agregat. Cement yang digunakan di Indonesia harus memenuhi standar SII.0013-81. Kerajinan Portland (PC).

1.7.2. Agregat Halus

Agregat halus, atau pasir, adalah fragmen mineral keras yang bentuknya hampir bulat, tajam, dan permanen, dengan ukuran sebagian besar partikel berkisar antara 0,07 dan 5 mm. (SNI 03-1750-1990). Agregat halus digunakan sebagai pengisi di blok-blok lantai sehingga mereka dapat meningkatkan kekuatan, mencegah pengencangan, dan mengurangi penggunaan ikatan dan semen. Pasir adalah salah satu kombinasi beton yang ditunjuk sebagai agregat halus. Kualitas agregat halus ini mendikte kualitas blok paving yang akan diproduksi.

Mengenai klasifikasi berbagai jenis pasir yang biasanya kita kenal:

1. Pasir Beton

Pasir beton adalah bahan berkualitas untuk konstruksi, tetapi datang dengan biaya yang agak tinggi, seperti yang ditunjukkan pada daftar harga untuk pasir. Beton pasir hitam sering memiliki biji-bijian halus yang tidak hancur ketika dicampur dan akan mendapatkan kembali bentuk mereka. Pasir ini sangat baik untuk penggilingan, pemasangan

dinding, dan pekerjaan fondasi, serta untuk meletakkan batu bata dan batu.

2. Pasir Pasang

Pasir pasang lebih halus dari pasir beton dan kehilangan strukturnya saat dipanaskan tanpa kembali ke bentuk aslinya. Jenis pasir ini lebih murah dari pasir beton. Pasir biasanya digunakan untuk mencampur dengan beton untuk memastikan tidak terlalu kasar, menjadikannya cocok untuk menutupi dinding.

3. Pasir Elod

Pasir elod memiliki biji-bijian terkecil dibandingkan dengan pasir beton dan jenis-jenis pasir lainnya. Ciri-ciri yang menentukan dari pasir elod adalah bahwa ketika terganggu, itu akan pecah dan tidak tumbuh kembali. Pasir ini masih mengandung campuran kotoran dan hitam dalam warna. Jenis pasir ini tidak cocok untuk konstruksi bangunan. Pasir ini biasanya digunakan untuk mencampur dengan beton untuk pemangkasan dinding atau untuk membuat batu bata.

4. Pasir Merah

Pasir merah, juga dikenal sebagai pasir Jebrod di daerah Sukabumi atau Cianjur, berasal dari wilayah Jebrod di Cianjura. Pasir Jebrod biasanya cocok untuk bahan Cor karena memiliki diameter yang hampir identik dengan pasir beton tetapi lebih kasar dan mengandung batuan besar.

1.7.3. Abu Batu Pecah

Abu Batu adalah sisa dari proses pembuatan batu yang hancur. Di setiap area, makeup batu abu digunakan dalam campuran beton terutama untuk meningkatkan karakteristik beton. Abu batu adalah abu yang mengandung sejumlah besar silika dan alumina, serta senyawa alkali, besi, dan batu kapur. Harga yang murah. Menggunakan batu abu alih-alih semen dapat mengurangi kebutuhan untuk semen. Batu abu memiliki komponen silika rapuh yang non-kristal, yang memungkinkannya untuk mengeras ketika dikombinasikan dengan semen. Senyawa yang terbentuk antara silika tanpa bentuk dan batu kapur adalah komposisi silikat kalsium yang sulit larut dalam air.

1.7.4. Air

Persyaratan air sesuai dengan Peraturan Standar Beton Indonesia tahun 1971 adalah sebagai berikut:

1. Tidak mengandung lumpur (atau benda melayang lainnya) lebih dari gram/liter.
2. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
3. Tidak mengandung senyawa-senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

Jumlah air yang digunakan dalam membuat campuran harus benar, karena menggunakan terlalu banyak air akan mengakibatkan banyak gelembung air terbentuk setelah proses hidrasi, yang menyebabkan penurunan kekuatan *paving block*.

1.7.5. Abu Terbang (fly ash)

Abu terbang (FA), produk sampingan dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik termal, telah memperoleh pengakuan signifikan sebagai bahan semen pelengkap dalam produksi beton. Pemanfaatannya sebagai pengganti sebagian semen Portland terutama dikaitkan dengan sifat pozolannya, yang meningkatkan karakteristik mekanis dan daya tahan beton. Penggabungan FA dapat menghasilkan produksi beton berkekuatan tinggi dengan daya tahan yang lebih baik, sebagaimana dibuktikan oleh berbagai penelitian (Saha et al. 2018). Secara khusus, ketika FA merupakan bagian substansial dari bahan semen—seringkali melebihi 50%—beton yang dihasilkan disebut sebagai beton abu terbang volume tinggi (HVFAC), yang telah menunjukkan kinerja yang menjanjikan dalam hal kekuatan dan ketahanan terhadap degradasi lingkungan (Tošić et al. 2018).

Selain itu, manfaat lingkungan dari penggunaan abu terbang tidak dapat diabaikan. Industri beton merupakan penyumbang emisi gas rumah kaca yang signifikan, terutama karena produksi semen Portland. Dengan mengganti semen dengan FA, jejak karbon yang terkait dengan produksi beton dapat dikurangi secara signifikan, karena FA merupakan bahan limbah yang jika tidak akan memerlukan pembuangan yang mahal (X. H. Wang et al. 2020). Penggantian ini tidak hanya meminimalkan permintaan semen tetapi juga mengatasi tantangan lingkungan yang ditimbulkan oleh pembuangan abu terbang, sehingga mendorong praktik konstruksi yang lebih berkelanjutan (Nawaz, Heitor, and Sivakumar 2020).

Selain keuntungan lingkungannya, abu terbang berkontribusi pada pengurangan permeabilitas beton dan meningkatkan ketahanannya terhadap reaksi alkali-silika (ASR), yang merupakan masalah umum dalam struktur beton. Kehadiran FA dalam beton telah terbukti menurunkan alkalinitas larutan pori, sehingga mengurangi ekspansi yang disebabkan oleh ASR (Saha and Sarker 2016). Lebih jauh lagi, penggunaan FA dapat meningkatkan kemampuan kerja campuran beton, memungkinkan rasio air-semen yang lebih rendah tanpa mengorbankan kekuatan (Maeijer et al., 2020)(Kara De Maeijer et al. 2020). Karakteristik ini sangat bermanfaat dalam mencapai kinerja yang diinginkan dalam berbagai aplikasi beton.

Singkatnya, penggunaan abu terbang sebagai pengganti sebagian semen dalam produksi beton didukung oleh sifat pozolannya, manfaat lingkungan, dan peningkatan ketahanan dan kemudahan pengerjaan beton. Faktor-faktor ini secara

kolektif menjadikan abu terbang sebagai material yang berharga dalam upaya mencari solusi beton yang lebih berkelanjutan dan tangguh.

1.8. Penyerapan Air Pada Paving Block

Proporsi air yang dapat diserap oleh batu paver melalui pori-pori disebut sebagai penyerapan air. Berat blok paving dapat dibandingkan saat mereka kering dan saat mereka basah (setelah dicampur dengan air) untuk mencapai hasil ini. Sampel dimasak selama 24 jam di sekitar 105 derajat Celcius untuk mengetahui berat batu paduan kering. Percobaan ini menentukan berat blok paving saat basah dan saat kering, memungkinkan untuk menghitung kapasitas penyerapan air menggunakan SNI 03-0691-1996 dan persamaan berikut:

$$\text{Penyerapan Air} = \frac{A-B}{B} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

A = berat bata beton basah

B = berat bata beton kering

1.9. Kuat Tekan

Tekanan beton (f'_c) adalah kekuatan per unit area yang menyebabkan item tes beton runtuh di bawah tekanan pressurizer, dihitung dengan membagi beban maksimum yang dapat ditanggung oleh area penetrasi rata-rata.

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

Keterangan :

f'_c = Kuat tekan beton (MPa atau N/mm²)

P = Gaya tekan aksial (N)

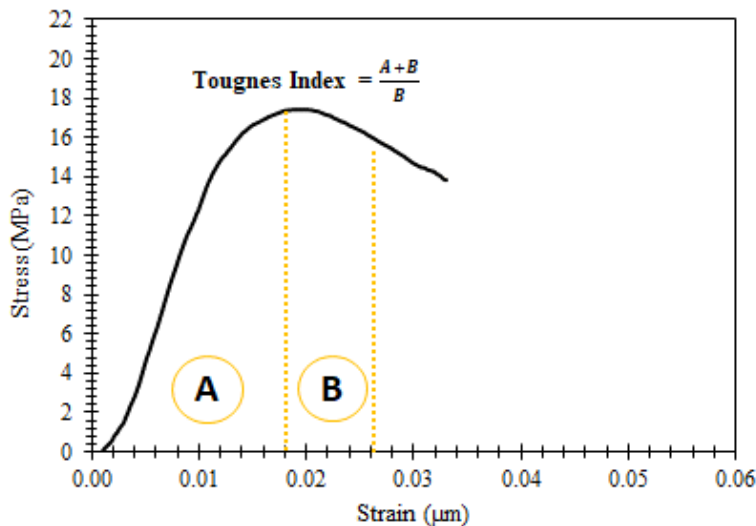
A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

SNI 03-00691-11996 mendefinisikan bahwa daya tahan yang tinggi dari blok paving termasuk dalam klasifikasi beton batako. (*paving block*). Kategori ini didefinisikan oleh empat atribut: karakteristik A, B, C, dan D, yang didasarkan pada kelas kualitas dan peringkat kekuatan uji tekanan. Beban per unit besar yang mengarah ke runtuhnya item uji beton di bawah kekuatan tekanan spesifik dari pressurizer disebut sebagai kekuatan tekanan beton (f'_c), seperti yang dinyatakan dalam SNI 1974-2011. Nilai kuat tekan beton dapat dihitung dengan membagi beban terbesar yang dapat ditanggung oleh objek uji selama uji dengan area penetrasi rata-rata yang diperlukan.

Setelah menentukan kuat tekan, dilakukan upaya untuk mengukur toughness index untuk semua CB. toughness index adalah metrik yang mencirikan perilaku tegangan pasca-puncak dari material padat, seperti beton. Indeks ini menunjukkan kapasitas energi beton untuk menahan fraktur.

Toughness index ditentukan dengan membagi integral kurva tegangan tekan-waktu dari tegangan awal hingga 80% tegangan puncak dengan integral kurva dari

tegangan awal hingga tegangan puncak. Dalam penelitian ini, tegangan tekan dipresentasikan pada sumbu y dan regangan dipresentasikan pada sumbu x, seperti yang tunjukkan pada Gambar 5. Perhitungan ini berasal dari penelitian sebelumnya (Gao et al. 2022),(Pasra et al. 2022).



Gambar 1. Definisi Toughness index

Modulus elastisitas menerapkan pendekatan eksperimental dengan pengujian tegangan-regangan uniaxial pada sampel paving block. Pengujian akan dilakukan menggunakan mesin uji universal yang dilengkapi dengan Linear Variable Differential Transformer (LVDT) untuk mengukur deformasi aksial secara presisi. Beban akan diberikan secara bertahap hingga mencapai titik runtuh sampel, dan data tegangan serta regangan akan direkam secara kontinu.

Selanjutnya, analisis data akan dilakukan dengan menggunakan Hukum Hooke yang menyatakan hubungan linear antara tegangan (σ) dan regangan (ϵ) dalam rentang elastis, yang dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2)$$

Di mana E adalah modulus elastisitas atau Modulus Young (GPa), σ adalah nilai tegangan stress dengan satuan (MPa), dan ϵ adalah nilai regangan dengan satuan (μm).

1.10. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dilaksanakan sesuai dengan standar SNI ASTM C597:2012, dengan menerapkan penyebaran gelombang longitudinal yang dihasilkan oleh transduser elektro akustik yang terkait dengan salah satu

permukaan beton yang sedang diuji. Setelah menembus beton, perambatan gelombang ini diterima dan diubah menjadi energi listrik oleh transduser kedua yang terletak pada jarak (L) dari transduser pemancar. Waktu tempuh (T) diukur secara elektronik. Kecepatan perambatan gelombang (V) dihitung dengan membagi L dengan T. Kecepatan perambatan gelombang ini, khususnya gelombang longitudinal dalam suatu massa beton, berkaitan dengan sifat elastisitas dan kerapatan, sesuai dengan persamaan berikut.

$$V = \frac{L}{T} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

V = Ultrasonic Pulse Velocity (m/s)

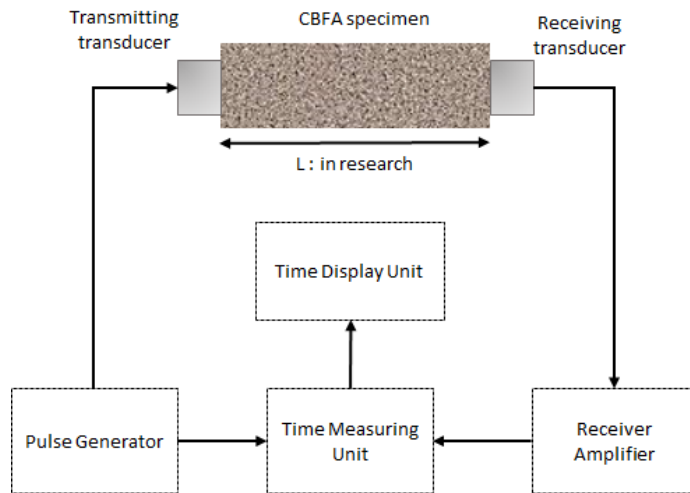
L = Jarak antara pusat permukaan transduser (m)

T = Waktu tempuh (s)

Pengujian kecepatan rambat gelombang melalui medium beton ini berguna dalam mengevaluasi keseragaman dan kualitas relatif beton, mendeteksi keberadaan rongga dan retakan, serta menilai efektivitas perbaikan retakan. Proses pengujian ini juga bermanfaat untuk memahami perubahan pada sifat-sifat beton, serta dapat diaplikasikan dalam pemeriksaan struktural untuk memperkirakan tingkat kerusakan atau retakan pada material beton. Pemakaian pengujian ini untuk memantau perubahan kondisi dalam suatu periode tertentu menunjukkan pentingnya memberikan penandaan pada lokasi pengujian pada struktur, sehingga memastikan pengujian dapat diulang pada posisi yang sama.

Kejenruhan beton menjadi faktor yang memengaruhi kecepatan perambatan gelombang, dan hal ini perlu dipertimbangkan dalam evaluasi hasil pengujian. Selain itu, kecepatan perambatan gelombang pada beton yang terjenruh air menunjukkan kurangnya sensitivitas terhadap variasi sifat beton. Kecepatan gelombang pada beton yang terjenruh air dapat mencapai peningkatan sebesar 5% dibandingkan dengan beton yang kering. Kecepatan perambatan gelombang tidak terkait dengan dimensi spesimen uji, dan pantulan gelombang dari permukaan benda uji. Ketepatan pengukuran bergantung pada ketrampilan operator dalam menentukan jarak yang tepat antara transduser pengirim dan penerima, serta kemampuan peralatan untuk mengukur waktu tempuh dengan akurat.

Ketepatan hasil pengukuran sinyal dan waktu tempuh dipengaruhi oleh penempatan yang tepat dari transduser pada permukaan beton. Penggunaan agen penghubung (*coupling agent*) dan penerapan tekanan yang memadai pada transduser diperlukan untuk menjamin stabilitas waktu tempuh. Kuat sinyal yang diterima juga dipengaruhi oleh jarak tempuh, serta adanya keretakan atau penurunan kualitas beton yang diuji. Peralatan pengujian, seperti yang dijelaskan secara skematis pada Gambar 3, melibatkan generator kecepatan perambatan gelombang, alat transduser (pengirim dan penerima) yang panjang, amplifier, sirkuit pengukuran waktu, unit tampilan waktu, dan kabel penghubung.



Gambar 2. Skematik pengujian *ultrasonik pulse velocity* (UPV)

Beton memerlukan banyak sumber daya alam, termasuk pasir, batu, air, dan semen. Proses produksi beton dapat menghasilkan gas rumah kaca dan gas polutan yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Pada tahap awal produksi beton, proses penggalian bahan mentah akan mengganggu ekosistem sekitar dan memungkinkan terjadinya erosi tanah. Selain itu, pemanfaatan sumber daya alam dalam jumlah yang besar untuk memproduksi beton juga berdampak pada keberlangsungan lingkungan. Selama tahap pengadukan, pengangkutan, dan pengecoran beton, terdapat emisi gas polutan seperti karbon monoksida, nitrogen oksida, dan gas lainnya yang menjadi hasil dari proses pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan energi. Emisi gas ini berkontribusi pada polusi udara dan memberikan dampak negatif bagi kesehatan manusia dan lingkungan sekitarnya. Selain itu, penggunaan air pada proses produksi beton juga dapat memicu dampak lingkungan yang tidak diinginkan, seperti penurunan kualitas air dan degradasi habitat akuatik. Biasanya, air digunakan dalam jumlah besar untuk mencampur bahan mentah menjadi beton, dan air ini kemudian harus dibuang dengan memperhitungkan tingkat pencemaran dan sisa-sisa bahan kimia. Namun, ada beberapa usaha untuk mengurangi dampak lingkungan dari produksi *paving block*, seperti penggunaan beton ramah lingkungan yang menggunakan bahan-bahan alternatif dan menggunakan *admixture*.

Adapun parameter yang umum untuk menganalisa dampak lingkungan antara lain *Global Warming Potential* (GWP), *Abiotic Depletion Potential* (ADP), *Acidification Potential* (AP), dan *Eutrophication Potential* (EP). 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.

Kategori ADP menggambarkan pengurangan jumlah global bahan baku yang tidak dapat diperbaharui. Kategori dampak ini terkait dengan ekstraksi material abiotik murni, misalnya ekstraksi agregat, bijih logam, mineral, tanah, dll. Ekstraksi zat-zat tersebut dapat berarti bahwa kapasitas alami bumi terlampaui dan membuatnya tidak tersedia untuk digunakan oleh generasi mendatang. Kategori ini mengatasi kelangkaan unsur yang dipertimbangkan.

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 (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) 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

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. Sumbernya termasuk pupuk dan emisi nitrogen oksida (NO_x) dari pembakaran bahan bakar fosil.

Penelitian ini mengadopsi rumus yang terdapat pada penelitian sebelumnya (Walach *et al.*, (2019) yang mengestimasi nilai parameter dampak lingkungan dari setiap 1 m³ (Fu) campuran beton melalui persamaan (5) :

$$E = \sum_{i=1}^n N_i \times w_i \dots\dots\dots(5)$$

Dimana :

E = dampak lingkungan

N_i = standar dampak lingkungan untuk kategori ke-i

w_i = berat kategori ke-i (kg/m³)

Inventarisasi parameter lingkungan ADP, GWP, ODP, POCP, AP, dan EP dilakukan dengan mengkaji literatur saintifik yang terpercaya. Tabel 2 memperlihatkan nilai-nilai ADP, GWP, ODP, POCP, AP, dan EP untuk material OPC, pasir, air, batu pecah, FA, yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari literatur.

Tabel 2. Data dampak lingkungan dari produksi bahan paving block

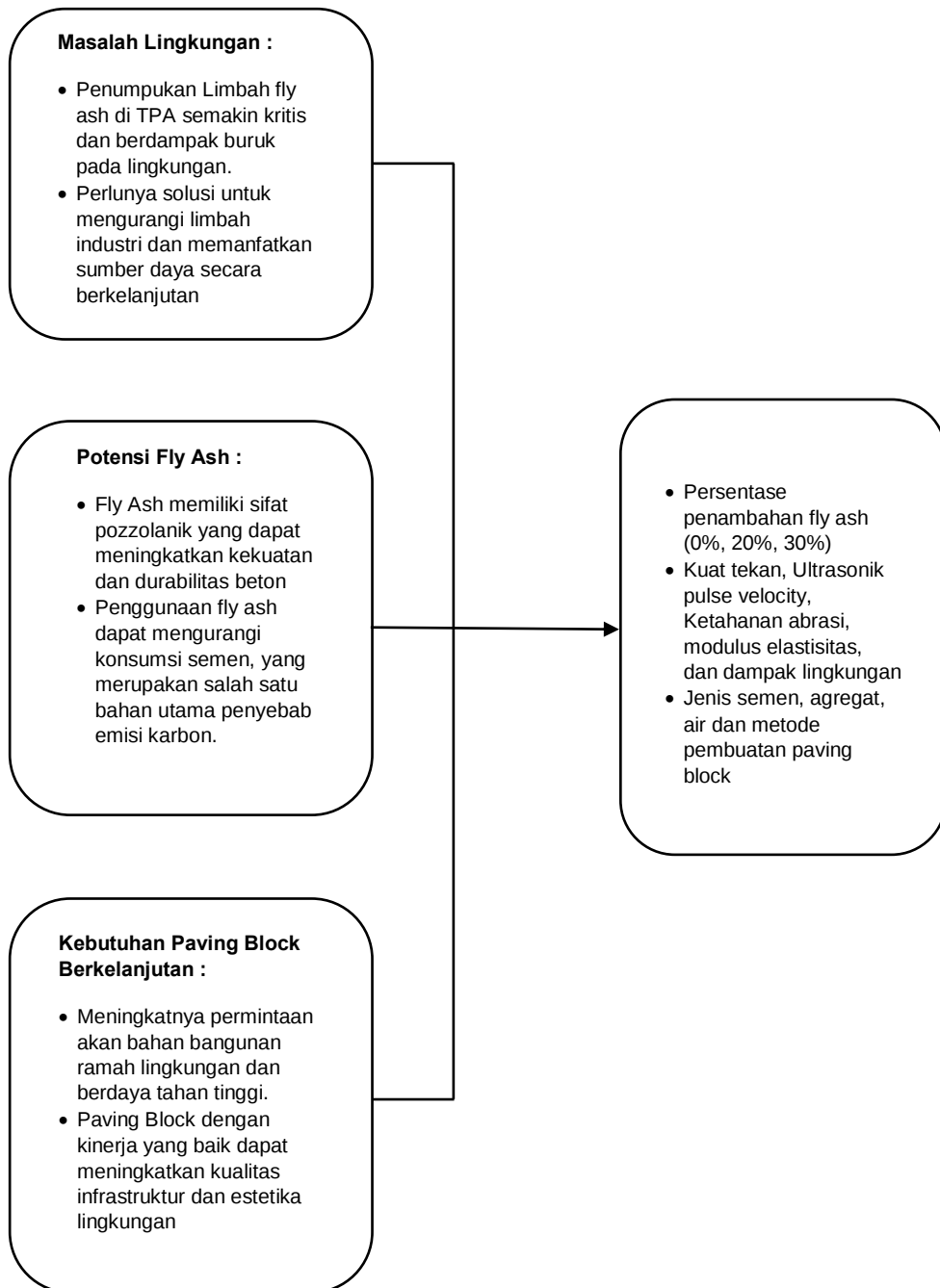
Dampak Lingkungan	Material				
	Fly Ash (Chen et al. 2010)	OPC (Ohemeng and Naghizadeh 2023)	Sand (Margarida et al. 2015)	Water (Shakr Piro et al. 2022)	Coars Agregat (Rajib K. Majhi, Padhy, and Nayak 2021)
ADP (kgSbeq)	3.37.E-04	3.99.E-03	3.34.E-10	1.57.E-11	1.09.E-09
GWP (kgCO ₂ eq)	8.77.E-03	9.51.E-01	9.87.E-03	1.33.E-04	2.44.E-02
ODP (kgCFC-11 eq)	5.58.E-09	1.09.E-07	1.71.E-11	5.93.E-12	2.43.E-10
POCP (kgC ₂ H ₄ eq)	3.22.E-06	8.31.E-05	2.80.E-06	4.99.E-08	7.83.E-06
AP (kgSO ₂ eq)	5.53.E-05	2.76.E-03	4.58.E-05	3.87.E-08	1.44.E-04
EP (kgPO ₄ eq)	8.23.E-06	3.60.E-04	1.08.E-05	9.70.E-07	3.18.E-05

1.11. Desain Konseptual

Kerangka konseptual yang disajikan menyoroti permasalahan lingkungan yang mendesak terkait penumpukan limbah fly ash di tempat pembuangan akhir (TPA) serta potensi pemanfaatannya sebagai bahan baku dalam pembuatan paving block. Limbah fly ash, sebagai hasil samping dari proses industri, memiliki sifat pozzolanik yang dapat meningkatkan kualitas beton. Penggunaan fly ash dalam produksi paving block tidak hanya memberikan solusi terhadap masalah lingkungan, tetapi juga membuka peluang untuk mengembangkan produk bangunan yang lebih berkelanjutan.

Pemanfaatan fly ash dalam produksi paving block memiliki beberapa keuntungan. Pertama, fly ash dapat mengurangi konsumsi semen, yang merupakan salah satu bahan utama penyebab emisi karbon. Dengan demikian, penggunaan fly ash berkontribusi pada upaya mitigasi perubahan iklim. Kedua, sifat pozzolanik fly ash dapat meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton, sehingga paving block yang dihasilkan memiliki kualitas yang lebih baik dan daya tahan yang lebih lama. Ketiga, penggunaan fly ash sebagai bahan baku dapat mengurangi volume limbah yang perlu dibuang ke TPA, sehingga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengoptimalkan penggunaan fly ash dalam produksi paving block. Beberapa variabel yang perlu diperhatikan antara lain persentase penambahan fly ash, jenis semen, agregat, dan metode pembuatan. Selain itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap kinerja paving block yang dihasilkan, meliputi kuat tekan, ketahanan terhadap abrasi, dan dampak lingkungan. Dengan demikian, dapat diperoleh data yang lebih akurat mengenai potensi pemanfaatan fly ash sebagai bahan baku dalam industri konstruksi.



Gambar 3. Kerangka Konseptual

1.12. Penelitian Terdahulu

Temesgen Fantu dkk 2021 melakukan penelitian yang berjudul *Investigasi eksperimental Kuat Tekan Fly Ash Pada Beton Mutu Tinggi Grade C-55 (Experimental Investigation Of Compressive Strength For Fly Ash On Hight Strength Concrete C-55 Grade)*. Dimana kesimpulan dari penelitian tersebut yaitu Penilaian eksperimental menunjukkan bahwa beton abu terbang, ketika tidak menggunakan superplasticizer, menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan sampel kontrol. Ketinggian tumpahan adalah 42 mm ketika 10% lalat digunakan bukan beton, dan jika lebih dari 10% lumpur digunakan, nilai lalat menurun. Namun, dengan penambahan superplasticizer, kualitas beton yang dapat dioperasikan meningkat sampai persentase penggantian abu lalat mencapai 25%. Kekuatan beton yang diganti dengan abu lalat menurun pada hari ke-7 dan ke-14, tetapi di hari ke-28, sampel beton dengan abu Lalat menunjukkan kekuatan yang lebih baik ketika hingga 10% dari semen digantikan oleh abu lumpur. Kepadatan beton dengan abu lalat sedikit berkurang, dengan penurunan yang paling mencolok terjadi ketika 30% dari semen digantikan dengan abu-abu lalat, menghasilkan penurunan 2,85% dibandingkan dengan sampel kontrol. Persentase terbaik dari abu lalat ke semen pengganti adalah 10%, yang mengarah pada kekuatan kompresi 67,20 MPa dan 64,10 MPa, masing-masing. Fly ash, limbah industri, dapat digunakan dalam beton yang kuat, dan penambahan superplasticizer meningkatkan kemampuannya untuk bekerja dengan dan ketahanan kompresi.

Oluwarotimi Olofinnadea dkk (2021) melakukan penelitian yang berjudul *Pengelolaan Sampah Padat Di Negara Berkembang: Penggunaan Kembali Agregat Slag Baja Dalam Produksi Paving Block Beton Yang Ramah Lingkungan (Solid Waste Management In Developing Countries: Reusing Of Steel Slag Aggregate In Eco-Friendly Interlocking Concrete Paving Blocks Production)*. Studi ini mengevaluasi kinerja slag tungku sebagai pengganti pasir alam dalam produksi paving block beton interlocking. Berdasarkan temuan penelitian, kesimpulan berikut dapat diambil, yaitu 1. Studi ini menunjukkan kemungkinan penggunaan slag baja limbah dalam produksi unit blok beton interlocking yang ramah lingkungan dengan kepadatan lebih tinggi dibandingkan dengan paving beton interlocking konvensional. 2. Hasilnya menunjukkan peningkatan kekuatan tekan yang stabil dari batu paving yang saling mengunci dengan peningkatan proporsi slag tungku. Namun, itu hanya meningkat hingga 40% setelah itu ada kehilangan kekuatan. Oleh karena itu, ini menunjukkan bahwa 40% optimum adalah persentase maksimum slag tungku untuk menggantikan pasir alam tanpa mengurangi kekuatan paving block beton. 3. Studi ini juga menunjukkan penurunan kekuatan tarik belah paving block beton seiring dengan meningkatnya jumlah agregat slag. Namun, perkerasan beton dengan penggantian slag 20% optimal untuk pasir mencatat kekuatan tarik tertinggi dibandingkan dengan kontrol. 4. *Paving block* kontrol diamati menunjukkan kapasitas penyerapan air tertinggi. Sedangkan penyerapan air menurun dengan bertambahnya jumlah agregat WSF untuk semua sampel. 5.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *paving block* beton interlocking yang mengandung slag tungku memenuhi standar yang ditentukan dalam hal kekuatan untuk unit *paving block* interlocking yang dapat digunakan di area untuk aplikasi non-lalu lintas seperti jalur pejalan kaki dan lanskap, atau untuk jalan masuk dengan lalu lintas sangat ringan untuk bangunan gedung dan area parkir mobil. Studi ini menunjukkan bahwa material slag baja bekas dapat dimanfaatkan dalam produksi paving block beton interlocking yang ramah lingkungan untuk membantu mencegah pencemaran lingkungan dan pembuangan sembarangan pada lingkungan. Studi ini juga dengan jelas menunjukkan bahwa slag dapat diadopsi sebagai bahan konstruksi inovatif alternatif dalam konstituen beton untuk mencapai pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan penghijauan lingkungan.

Almeshal *et al.*, (2020), melakukan penelitian mengenai penggunaan *polietilena tereftalat* (PET) sebagai pengganti sebagian pasir dalam beton. Plastik merupakan jenis limbah padat yang memiliki dampak lingkungan yang kuat. Sejumlah enam campuran beton yang mengandung PET disiapkan sebagai pengganti sebagian pasir dengan tingkat penggantian 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50%. Dalam penggunaan PET dapat mengurangi berat sendiri beton dalam struktur dan membantu melestarikan sumber daya alam seperti pasir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat lentur beton menurun seiring dengan peningkatan rasio penggantian PET, dengan penurunan sebesar 2,4% pada rasio penggantian 10%, dan penurunan sebesar 58% dan 84,2% pada rasio penggantian 40% dan 50% setelah 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa UPV menurun seiring dengan peningkatan rasio penggantian PET, dengan penurunan sebesar 2,93% pada rasio penggantian 10%, dan penurunan sebesar 56,7% pada rasio penggantian 50% setelah 28 hari. Meskipun sifat mekanik beton menurun dengan peningkatan rasio penggantian PET, partikel plastik dapat diinkapsulasi dari bahan lain dan menghasilkan beton yang aman secara lingkungan.

Alqahtani *et al.*, (2016), melakukan penelitian tentang penggunaan daur ulang limbah plastik dalam industri konstruksi, khususnya dalam beton, yang menggunakan jumlah besar agregat. Sebuah agregat baru yaitu *recycled plastic aggregate* (RPA) yang terdiri dari plastik daur ulang dikembangkan. Agregat yang dihasilkan bersifat ringan, dengan kerapatan berkisar dari 510 hingga 750 kg/m³ dan daya serap antara 2,7 hingga 9,81%. Properti lainnya sebanding dengan agregat berkerapatan serupa. Berbagai komposisi agregat daur ulang digunakan dalam beton, dan properti hasil beton segar dan beton yang sudah matang diukur. Untuk rasio air semen (w/c) tertentu, dapat dicapai slump antara 40 hingga 220 mm dan kerapatan segar antara 1.827 hingga 2.055 kg/m³. Selain itu, kekuatan pada usia 28 hari antara 14 hingga 18 MPa dapat dicapai. RPA dapat digunakan dalam beton sebagai pengganti total untuk agregat ringan konvensional (LWA). Pengurangan kekuatan lentur beton RPA kurang terlihat dibandingkan dengan pengurangan kekuatan tekan karena perilaku elastis dan duktil plastik dalam partikel RPA. Beton RPA dapat digunakan untuk struktur di mana beton dengan perilaku daktil dibutuhkan sebagai pengganti beton LWA. Mendaur ulang limbah plastik sebanyak 3 juta ton akan mengurangi emisi CO₂ sebanyak 3,8 juta ton.

(Ohemeng and Naghizadeh 2023) melakukan penelitian untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi limbah beton dan fly ash (FA) terhadap kinerja mortar pasangan bata, beserta analisis biaya dan dampak lingkungan. Studi ini menemukan bahwa penggabungan FA dalam mortar semen WCP menghasilkan pengurangan biaya dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, mortar yang dihasilkan memenuhi persyaratan kekuatan untuk pekerjaan pasangan bata serta memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan.

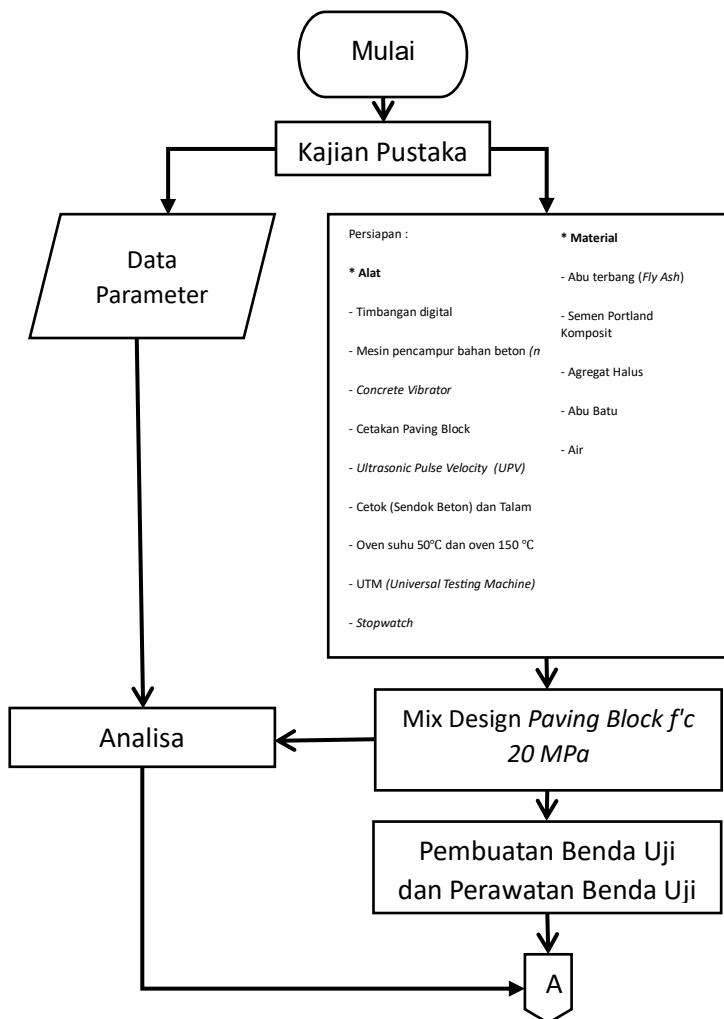
BAB II METODE

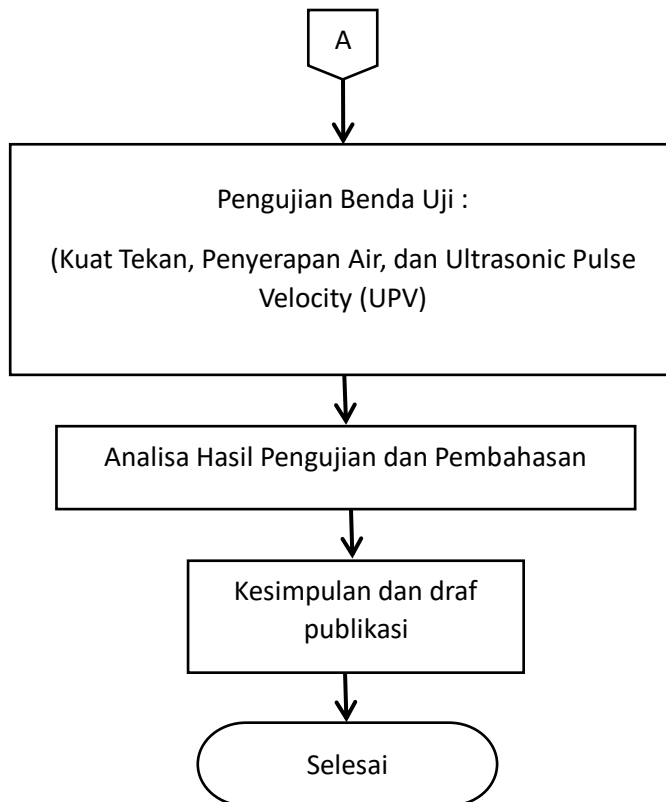
2.1. Tempat dan Waktu Penelitian

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

2.2. Metode Penelitian

Tahap penelitian ini dapat dilihat secara sistematis dalam bentuk diagram alir pada Gambar 4 sebagai berikut:





Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

2.3. Desain Benda Uji

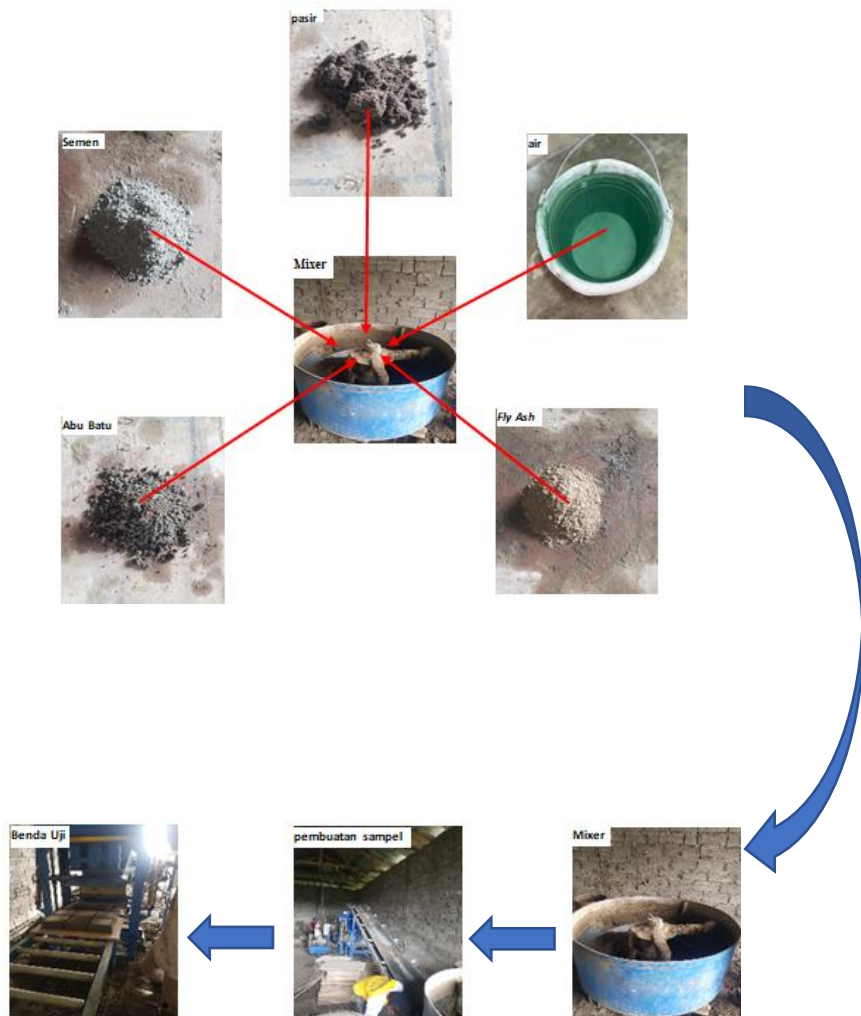
Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk persegi dengan Panjang 20 cm, Lebar 10 cm dan Tinggi 8 cm.

Dilakukan pembuatan benda uji meliputi *paving block* normal dan *paving block* sebagai pengganti pasir dan semen menggunakan limbah abu terbang sebanyak 0%, 20%, dan 30%. Masing-masing variasi benda uji terdapat 15 sampel benda uji. Untuk memudahkan dalam penelitian maka benda uji diberi kode tertentu. Kode tersebut terdiri dari beberapa variasi yang disubstitusi limbah abu terbang disingkat seperti CBFA-0, CBFA-20, dan CBFA-30.

Berikut adalah Tabel 3 Variasi benda uji *paving block* dan Gambar 5 pembuatan benda uji:

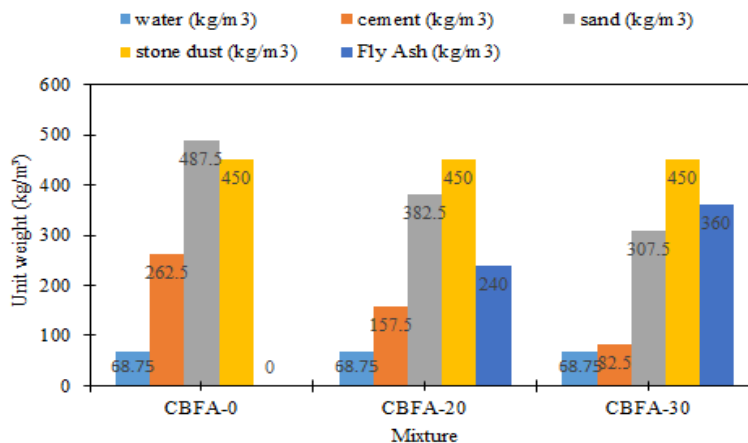
Tabel 3. Benda Uji *Paving Block*

Nama Sampel	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tinggi (cm)	Jumlah Variasi
CBFA-0	20	10	8	15
CBFA-20	20	10	8	15
CBFA-30	20	10	8	15

**Gambar 5.** Pembuatan Benda Uji

2.4. Analisa Rancangan Campuran (Mix Design)

Komposisi campuran *paving block* untuk $f'c$ 20 MPa. Dimana, pembuatan benda uji meliputi *paving block* normal dan *paving block* sebagai pengganti pasir dan semen menggunakan limbah abu terbang sebanyak 20% dan 30%. Masing-masing variasi benda uji terdapat 15 sampel benda uji. Komposisi yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 6 sebagai berikut:



Gambar 6. Mix Dsign

2.5. Pembuatan Benda Uji

Pembuatan dan pengujian ini dirancang untuk mengetahui pengaruh kinerja *paving block* dengan limbah abu terbang sebagai pengganti pasir dan semen. Indikator yang paling penting dari *paving block* adalah kuat tekan, pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 dan 90 hari dengan ukuran sampel 20cm x 10cm x 8cm. Metode pencampuran yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Menyiapkan material dengan komposisi campuran yang telah ditentukan;
2. *Fly Ash* (abu terbang), 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. Masukkan 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 cetakan sampai full kemudian diratakan sebanyak 25 kali tumbukan, 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 dan 90 hari.

2.6. Pengujian Benda Uji

2.6.1. Kuat Tekan Paving Block

Pengujian kuat tekan (*Compressive Strength*) berdasarkan SNI 03-0691-1996 adalah untuk mengetahui beban tekan setinggi mungkin yang dapat ditahan oleh *paving block*. Alat uji yang digunakan adalah *Universal Testing Machine* (UTM) berkapasitas 1000 kN. Dalam pengujian ini, benda uji akan di press dan diproduksi dengan menggunakan metode secara press hidrolis dan vibrator. Benda uji dipres hingga hancur kemudian dihitung kuat tekannya.

Sesuai SNI 03-0691-1996, kuat tekan (f'_c) substansial menyinggung beberapa besar beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji meledak ketika terkena daya tekan tertentu yang dihasil oleh mesin tekan.

Pengujian kuat tekan dilakukan pada *paving block* dengan ukuran 20 cm x 10 cm x 8 cm. dimana pengujian dilakukan saat *paving block* berumur 28 dan 90 hari.

Berdasarkan SNI 03-0691-1996 bahwa persyaratan mutu sifat-sifat actual *paving block* pada Tabel 4 sebagai berikut:

Tabel 4. Syarat Mutu Pada Sifat Fisik Kuat Tekan *Paving Block*

MUTU	KUAT TEKAN (MPa)	
	Rata-rata	Min.
A	40	35
B	20	17
C	15	12,5
D	10	8,5

Keterangan:

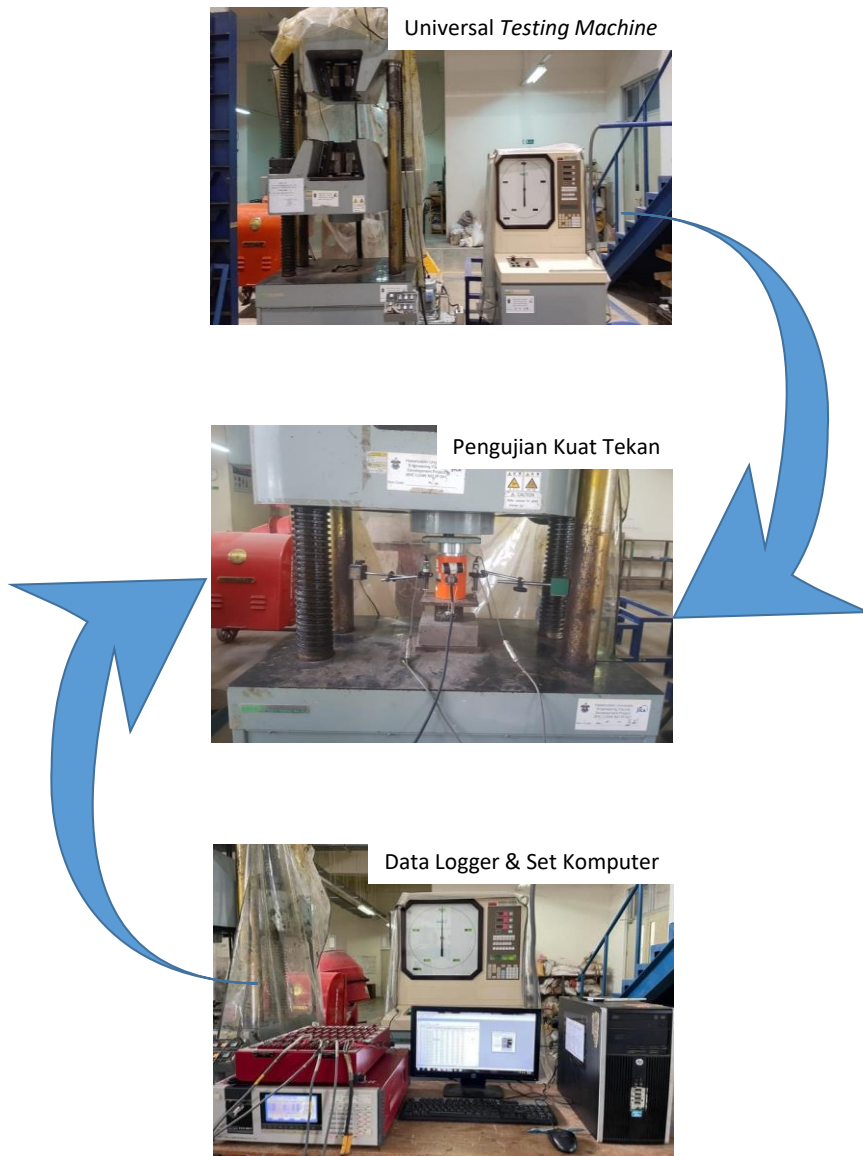
Mutu A = Digunakan untuk jalan

Mutu B = Digunakan untuk peralatan parkir

Mutu C = Digunakan untuk pejalan kaki

Mutu D = Digunakan untuk taman dan penggunaan lain

Kemudian rencana mutu yang diambil pada penelitian *paving block* dengan limbah abu terbang sebagai pengganti pasir adalah mutu B digunakan untuk dan nilai kuat tekan rencana adalah 20 Mpa.



Gambar 7. Pengujian Kuat Tekan *Paving Block*

2.6.2. Pengujian Penyerapan Air *Paving Block*

Pengujian penyerapan air ini dilakukan untuk mengetahui penyerapan air pada *paving block* dengan benda uji berbentuk persegi panjang. Dimana pengujian untuk mengukur persentase kandungan air setelah dan sebelum dilakukan perendaman seperti pada Gambar 9 dibawah ini:



Gambar 8. Pengujian Penyerapan Air *Paving Block*

Berdasarkan Tabel 5 SNI 03-0691-1996 mengenai sifat-sifat fisika, pada tabel tersebut ada 4 klasifikasi mutu *paving block* yakni mutu A, B, C, dan D. Dimana untuk syarat mutu pada sifat fisik penyerapan air rata-rata *paving block* seperti pada Tabel 5 dibawah ini:

Tabel 5. Syarat Mutu Pada Sifat Fisik Penyerapan Air *Paving Block*

MUTU	Penyerapan Air (%)
	Rata-rata maks.
A	3
B	6
C	8
D	10

Keterangan:

Mutu A = Digunakan untuk jalan

Mutu B = Digunakan untuk peralatan parkir

Mutu C = Digunakan untuk pejalan kaki

Mutu D = Digunakan untuk taman dan penggunaan lain

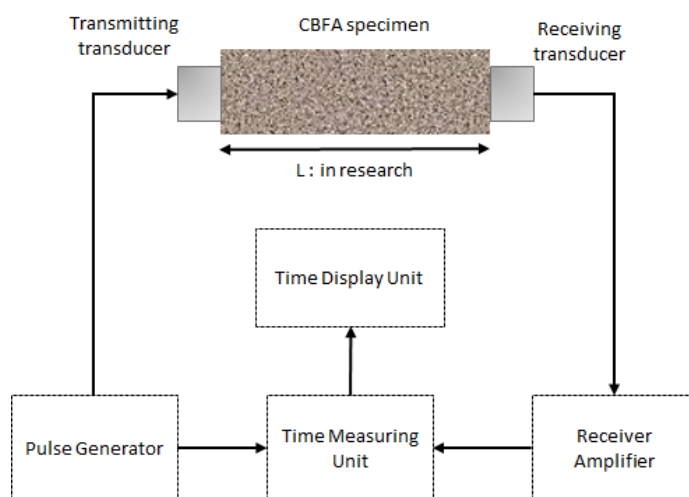
2.6.3. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dilakukan berdasarkan SNI ASTM C597:2012 tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui *Paving Block*. Pengujian UPV menggunakan alat *Ultrasonic Pulse Velocity Proceq Pundit Lab+*. Tujuan dari pengujian ini ialah untuk mengetahui kecepatan rambat

gelombang dari paving block. 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.

Berikut Gambar 10 Pengujian UPV *paving block* 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 memasang transduser penerima dan penguat (*Amplifier*)
3. Memasang gemuk pada ujung sampel yang akan diletakkan transduser
4. Memulai pembacaan kecepatan rambat gelombang pada alat
5. Mencatat hasil kecepatan rambat gelombang dari alat.



Gambar 9. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity *Paving Blok*

2.6.4. *Environment Performance dari Paving Block*

Sebuah analisis efek insertasi *fly ash* (FA) pada konsumsi energi yang dibutuhkan untuk membuat blok paving serta *global warming potential* (GWP), *abiotic depletion potential* (ADP), *Ozone Depletion Potential* (ODP), *Photochemical Ozone Generation Potential* (POCP), *acidification potential* (AP), dan *eutrophication potential* (EP) dilakukan. Referensi untuk nilai parameter dibuat ke sumber yang relevan. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengevaluasi keaslian insertasi *fly ash* dengan mempertimbangkan dua aspek sekaligus daripada mengandalkan hanya satu, seperti jumlah FA dan kuat tekan. Untuk memprediksi kriteria penerimaan FA sebagai pengganti untuk semen dan agregat halus, nilai parameter dampak lingkungan kemudian dibandingkan di bawah tekanan intensif.

Beberapa penelitian yang memperhatikan secara simultan kuat tekan dan emisi CO₂. Penelitian ini mengadopsi efisiensi kekuatan beton terhadap lingkungan

(Vembu et al., (Vembu and Ammasi 2023) Ozturk et al.,(Ozturk et al. 2022)) menjadi analisa performa kekuatan beton terhadap parameter lingkungan menjadi . Dalam penelitian ini menyediakan beberapa faktor simultan yang mencakup kuat lentur dengan parameter lingkungan (GWP, ADP, AP, dan EP) seperti pada persamaan 3, 4, 5, 6, 7, dan 8.

$$EP_{GWP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{GWP_{mix}}, \quad (3)$$

$$EP_{ADP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{ADP_{mix}} \quad (4)$$

$$EP_{ODP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{ODP_{mix}}, \quad (5)$$

$$EP_{POCP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{POCP_{mix}}, \quad (6)$$

$$EP_{AP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{AP_{mix}}, \quad (7)$$

$$EP_{EP/f'_{cn}} = \frac{f'_{cn}}{EP_{mix}}, \quad (8)$$

Dimana:

$EP_{GWP/f'_{cn}}$ = total GWP_{mix} nilai yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kekuatan tekan (MPa/kgCO₂)

$EP_{ADP/f'_{cn}}$ = nilai total ADP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSb)

$EP_{ODP/f'_{cn}}$ = nilai total ODP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kekuatan tekan (MPa/kgCFC-11)

$EP_{POCP/f'_{cn}}$ = nilai total $POCP_{mix}$ yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgC₂H₄)

$EP_{AP/f'_{cn}}$ = total nilai AP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgSO₂)

$EP_{EP/f'_{cn}}$ = total nilai EP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat tekan (MPa/kgPO₄)

f'_c = kekuatan tekan (MPa)

n = usia 28/90 hari