



TUGAS AKHIR (WT43250)

PENGARUH SUBSTITUSI LIMBAH GFRP (*GLASS FIBER REINFORCED POLYMER*) SEBAGAI AGREGAT HALUS BATA BETON TERHADAP SIFAT FISIKA, SIFAT MEKANIK, DAN KELAYAKAN LINGKUNGAN

Septiadi Brilian Erlangga
NRP. 1022040033

DOSEN PEMBIMBING :
Dr. Ir. WIWIK DWI PRATIWI, M.T.
MAR'ATUS SHOLIAH, S.ST., M.Sc.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGOLAHAN LIMBAH
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (WT43250)

**PENGARUH SUBSTITUSI LIMBAH GFRP (*GLASS FIBER
REINFORCED POLYMER*) SEBAGAI AGREGAT HALUS
BATA BETON TERHADAP SIFAT FISIKA, SIFAT
MEKANIK, DAN KELAYAKAN LINGKUNGAN**

**SEPTIADI BRILIAN ERLANGGA
NRP. 1022040033**

**DOSEN PEMBIMBING:
Dr. Ir. WIWIK DWI PRATIWI, M.T.
MAR'ATUS SHOLIAH, S.ST., M.Sc.**

**PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PENGOLAHAN LIMBAH
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026**

Halaman sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

PENGARUH SUBSTITUSI LIMBAH GFRP (*GLASS FIBER REINFORCED POLYMER*) SEBAGAI AGREGAT HALUS BATA BETON TERHADAP SIFAT FISIKA, SIFAT MEKANIK, DAN KELAYAKAN LINGKUNGAN

Disusun Oleh:

Septiadi Brilian Erlangga
1022040033

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4-Teknik Pengolahan Limbah
Jurusan Teknik Permesinan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 3 Juli 2026

Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

- | | | |
|------------------------------------|--------------------|---------|
| 1. Dr. Ir. Wiwik Dwi Pratiwi, M.T. | (4457744645231043) | (.....) |
| 2. Mar'atus Sholihah, S.ST., M.Sc. | (1742774675230282) | (.....) |
| 3. Ayu Nindyapuspa, S.T., M.T. | (0458769670230292) | (.....) |
| 4. Novia Anggraini, S.Pd., M.Pd. | (5755771672230352) | (.....) |

Dosen Pembimbing

NIDN/NUPTK

Tanda Tangan

- | | | |
|------------------------------------|--------------------|---------|
| 1. Dr. Ir. Wiwik Dwi Pratiwi, M.T. | (4457744645231043) | (.....) |
| 2. Mar'atus Sholihah, S.ST., M.Sc. | (1742774675230282) | (.....) |

Menyetujui
Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal

Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, ST., MT.

NIP. 197708192005011001

Mengetahui
Koordinator Program Studi

Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T.

NIP. 197804142005012002

Halaman sengaja dikosongkan

 PPNS POLYMER PELAYANAN NUSANTARA	PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	No. : F.WD I. 021 Date : 3 Nopember 2015 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
---	---	---

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Septiadi Brilian Erlangga

NRP. : 1022040033

Jurusan/Prodi : Teknik Permesinan Kapal/ Teknik Pengolahan Limbah

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

Pengaruh Substitusi Limbah GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) sebagai Agregat Halus Bata Beton terhadap Sifat Fisika, Sifat Mekanik, dan Kelayakan Lingkungan

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 1 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



Septiadi Brilian Erlangga
NRP 1022040033

Halaman sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir berjudul **“Pengaruh Substitusi Limbah GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) sebagai Agregat Halus pada Bata Beton terhadap Sifat Fisika, Sifat Mekanik, dan Kelayakan Lingkungan”** sebagai salah satu syarat penyelesaian studi pada Program Diploma IV Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, serta untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik.

Keberhasilan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini tidak lepas dari semangat, doa, dan dukungan dari berbagai pihak. Melalui kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu.

1. Kedua orang tua penulis, Ayah dan Ibu tercinta yang telah memberikan segala dukungan, perhatian, dan semangat untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
3. Bapak Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
4. Ibu Dr. Mirna Apriani, S.T., M.T. selaku Koordinator Program Studi D4 Teknik Pengolahan Limbah Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Ibu Dr. Ir. Wiwik Dwi Pratiwi, M.T. dan Ibu Mar’atus Sholihah, S.ST., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing I dan Dosen Pembimbing II yang telah membimbing dan memberi saran serta masukan sehingga Tugas Akhir dapat terselesaikan.
6. Ibu Ayu Nindyapuspa selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi D-IV Teknik Pengolahan Limbah, Ketua Dosen Penguji, dan Dosen Wali yang telah memberi arahan serta bimbingan selama penulis menjalani perkuliahan hingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

7. Ibu Novia Anggraini, S.Pd., M.Pd. selaku Dosen Penguji yang telah memberi kritik dan saran dalam penulisan Tugas Akhir.
8. Bapak dan Ibu Dosen Teknik Pengolahan Limbah yang telah membimbing dan memberi ilmu bermanfaat selama perkuliahan.
9. Bapak Supratikno, Ibu Nanik, Bapak Sulardi, Bapak Nurul Dwi, Ibu Elvira, Ibu Tuty, Ibu Rani, Ibu Manidah, serta seluruh bapak/ibu guru SMK Penerbangan Dharma Wirawan yang telah mendidik, membimbing, mendoakan, serta memberi semangat.
10. Keluarga Mahasiswa Teknik Pengolahan Limbah “IGNESCENT” yang senantiasa memberi dukungan, memberi semangat, menjadi rekan diskusi, serta membantu dalam Tugas Akhir ini.
11. Adik-adik PL23 dan PL24 yang telah membantu dalam pembuatan benda uji Tugas Akhir.
12. Bapak Rudi selaku pembimbing OJT dan mentor yang telah memberi dukungan dan banyak kesempatan belajar selama penulis menjalani OJT di PT MK Prima Indonesia.
13. Bapak Suroto dan Ibu Sri Wahyuti yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Kritik, saran, dan masukan dari semua pihak akan sangat penulis hargai guna perbaikan dimasa yang akan datang. Penulis berharap laporan ini bermanfaat bagi penulis serta pihak pihak lainnya.

Surabaya, 26 Juni 2026

Penulis,

Septiadi Brilian Erlangga

PENGARUH SUBSTITUSI LIMBAH GFRP (*GLASS FIBER REINFORCED POLYMER*) SEBAGAI AGREGAT HALUS BATA BETON TERHADAP SIFAT FISIKA, SIFAT MEKANIK, DAN KELAYAKAN LINGKUNGAN
Septiadi Brilian Erlangga

ABSTRAK

Timbulan limbah GFRP dari industri perkapalan menimbulkan permasalahan lingkungan akibat ketahanannya terhadap degradasi. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh substitusi limbah GFRP (0%, 2,5%, 5%, 7,5% terhadap agregat halus) dan substitusi semen dengan *fly ash* terhadap karakteristik bata beton: densitas, daya serap air, kuat tekan, dan kelayakan lingkungan menggunakan uji TCLP dengan perawatan bata beton selama 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan konsentrasi GFRP menurunkan densitas dari 2044,25 kg/m³ menjadi 1711,87 kg/m³ (7,5% limbah GFRP; 30% *fly ash*) dan menurunkan kuat tekan dari 13,11 MPa menjadi 2,99 MPa (7,5% limbah GFRP; 30% *fly ash*), serta meningkatkan daya serap air dari 6,55% menjadi 15,87% (7,5% limbah GFRP; 0% *fly ash*) apabila dibandingkan dengan variasi kontrol. Densitas bata beton memenuhi kriteria *mediumweight* (ASTM C-55), sedangkan daya serap dan kuat tekan memenuhi SNI 03-0348-1989. Hasil pengujian TCLP menunjukkan konsentrasi Pb (0,0115 mg/L), Zn (0,12 mg/L), dan Cl (31,8 mg/L) pada komposisi 7,5% GFRP dan 30% *fly ash* telah memenuhi baku mutu TCLP-A (PP 22/2021). Berdasarkan hasil penelitian, substitusi GFRP dan *fly ash* memengaruhi sifat fisik dan aspek kelayakan lingkungan bata beton yang membuka peluang pemanfaatan limbah GFRP sebagai material pendukung pada bata beton yang lebih ramah lingkungan.

Kata Kunci: Bata Beton, Limbah GFRP, *Fly Ash*, Kuat Tekan, TCLP

Halaman sengaja dikosongkan

***THE EFFECT OF SUBSTITUTING GFRP (GLASS FIBER
REINFORCED POLYMER) WASTE AS FINE AGGREGATE IN
CONCRETE BRICKS ON THEIR PHYSICAL AND
MECHANICAL PROPERTIES AND ENVIRONMENTAL
SUITABILITY***

Septiadi Brilian Erlangga

ABSTRACT

Generation of GFRP waste from the shipbuilding industry poses an environmental problem due to the material's resistance to degradation. This study evaluates the effects of substituting GFRP waste (0%, 2.5%, 5%, 7.5% by fine aggregate) and substituting cement with fly ash on the properties of concrete blocks, namely density, water absorption, compressive strength, and environmental suitability assessed by the TCLP, with specimens cured for 28 days. Test results indicate that increasing the GFRP content reduced density from 2044.25 kg/m³ to 1711.87 kg/m³ (7.5% GFRP; 30% fly ash) and reduced compressive strength from 13.11 MPa to 2.99 MPa (7.5% GFRP; 30% fly ash), while water absorption increased from 6.55% to 15.87% (7.5% GFRP; 0% fly ash) compared with the control. The block density meets the mediumweight criteria (ASTM C-55), and water absorption and compressive strength conform to SNI 03-0348-1989. TCLP results show concentrations of Pb (0.0115 mg/L), Zn (0.12 mg/L), and Cl (31.8 mg/L); the composition of 7.5% GFRP and 30% fly ash complies with TCLP-A limits (Government Regulation No. 22/2021). These findings indicate that substituting GFRP and fly ash affects the physical properties and environmental suitability of concrete blocks, suggesting the potential use of GFRP waste as a component in more environmentally friendly concrete blocks.

Keywords: Concrete Bricks, GFRP Waste, Fly Ash, Compressive Strength, TCLP

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Karakteristik Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3).....	7
2.2 Limbah GFRP (<i>Glass fiberglass reinforced plastic</i>).....	9
2.3 Metode Daur Ulang Limbah FRP	10
2.4 Boiler.....	12
2.5 <i>Fly Ash</i>	13
2.6 Solidifikasi	14
2.7 Bata Beton.....	16
2.7.1 Jenis dan Klasifikasi Bata Beton.....	17
2.7.2 Syarat Mutu Bata Beton	18
2.8 Bahan Penyusun Bata Beton	19
2.8.1 Agregat Halus.....	19
2.8.2 Semen Portland	20
2.8.3 Air.....	22
2.8.4 Bahan Tambah Beton (Aditif)	22

2.9 Perawatan Beton	23
2.10 Pengujian Material dan Benda Uji	25
2.10.1 Berat Jenis Pasir dan Limbah FRP	25
2.10.2 Gradasi Agregat Halus.....	25
2.10.3 Penyerapan Air	26
2.10.4 Waktu Ikut Semen.....	26
2.10.5 XRF (X-Ray Fluorescence)	27
2.10.6 Kuat Tekan.....	27
2.10.7 Daya Serap Air Maksimal dan Densitas	27
2.10.8 TCLP	28
2.11 Uji Statistik (MANOVA).....	28
2.12 Penelitian Terdahulu	29
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Diagram Alir Penelitian	33
3.2 Metode Penelitian	34
3.3 Tahap Identifikasi Masalah.....	35
3.4 Tahap Perumusan Masalah dan Penetapan Tujuan.....	35
3.5 Studi Literatur.....	35
3.6 Observasi Lapangan	36
3.7 Pengumpulan Data.....	36
3.8 Lokasi dan Waktu Penelitian	36
3.8.1 Lokasi Penelitian	36
3.8.2 Waktu Penelitian.....	36
3.9 Objek Penelitian	36
3.9.1 Variabel Bebas	38
3.9.2 Variabel Terikat.....	38
3.9.3 Variabel Kontrol	38
3.10 Definisi Operasional Penelitian	38
3.11 Pelaksanaan Penelitian.....	39
3.11.1 Persiapan Alat dan Bahan	39
3.11.2 Pengujian Karakteristik Material.....	40
3.11.3 <i>Mix Design</i>	42

3.11.4 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji	43
3.11.5 Pengujian Benda Uji.....	44
3.12 Analisis Kelayakan Lingkungan	47
3.13 Analisis Data	47
3.13.1 Uji Normalitas.....	48
3.13.2 Uji Homogenitas	48
3.13.3 Uji Hipotesa	48
3.14 Kesimpulan dan Saran.....	48
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1 Hasil Karakterisasi Fisik Material.....	51
4.1.1 Hasil Karakterisasi Semen	51
4.1.2 Hasil Karakterisasi <i>Fly Ash</i>	52
4.1.3 Hasil Pengujian Waktu Ikut.....	53
4.1.4 Hasil Uji Ukuran Partikel.....	54
4.1.5 Hasil Karakterisasi Pasir Lumajang.....	55
4.1.6 Hasil Karakterisasi Limbah GFRP.....	59
4.2 Hasil Karakterisasi Kimia Limbah.....	62
4.2.1 Hasil Karakterisasi Kimia <i>Fly ash</i> PLTU Paiton	63
4.2.2 Hasil Karakterisasi Kimia Limbah GFRP Bengkel Kayu PPNS	64
4.3 Pembuatan Bata Beton	65
4.4 Hasil Pengujian Fisik dan Mekanik Bata Beton	66
4.4.1 Hasil Pengujian Penyerapan Air Bata Beton.....	66
4.4.2 Hasil Pengujian Densitas Bata Beton.....	68
4.4.3 Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan Bata Beton	70
4.5 Analisis Kelayakan Lingkungan terhadap Limbah GFRP	73
4.6 Analisis Statistika	73
4.6.1 Uji Normalitas.....	74
4.6.2 Uji Homogenitas	75
4.6.3 Uji MANOVA	75
4.7 Pembahasan.....	76
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	85
5.1 Kesimpulan	85

5.2 Saran	85
DAFTAR PUSTAKA	87
Lampiran A	101
Dokumentasi Kegiatan Penelitian	101
Lampiran B	117
Hasil Pengujian Agregat Halus (Berat Jenis, Daya Serap Air, Kadar Lumpur Pasir dan Gradasi Agregat Halus) dan Binder (Berat Jenis, Ukuran Partikel, dan Waktu Ikat).....	117
Lampiran C	137
Validasi Hasil Pengujian Material di Laboratorium Limbah PPNS	137
Lampiran D.....	145
Perhitungan <i>Mix Design</i> Bata Beton	145
Lampiran E	151
Hasil Pengujian XRF Limbah	151
Lampiran F	157
Hasil Pengujian Densitas, Daya Serap Air, dan Kuat Tekan Bata Beton	157
Lampiran G.....	169
Hasil Pengujian TCLP Produk.....	169
Lampiran H.....	173
Hasil Pengujian Statistika.....	173

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perkiraan komposisi kimia beberapa serat kaca (wt.%).....	9
Tabel 2. 2 Persyaratan Sifat Kimia <i>Fly ash</i>	14
Tabel 2. 3 Persyaratan Sifat Fisik (ASTM C618-22).....	14
Tabel 2. 4 Syarat Mutu Klasifikasi Bata Beton Berdasarkan Densitas	18
Tabel 2. 5 Syarat Mutu Klasifikasi Peruntukan Bata Beton.....	19
Tabel 2. 6 Sifat Kimia Semen Rata-Rata	21
Tabel 2. 7 Sifat Fisika Semen Rata – Rata	22
Tabel 2. 8 Gradasi Analisis Ayakan Agregat Halus.....	25
Tabel 2. 9 Penelitian Terdahulu.....	31
Tabel 3. 1 Perbandingan Komposisi Bata Beton.....	37
Tabel 3. 2 Jumlah Benda Uji Berdasarkan Jenis Pengujian	37
Tabel 3. 3 Definisi Operasional Penelitian.....	38
Tabel 3. 4 <i>Mix Design</i> Bata Beton	42
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Densitas Semen PCC	51
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Densitas <i>Fly Ash</i>	52
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Waktu Ikut	53
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Densitas dan Penyerapan Pasir Lumajang	56
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Pasir Lumajang.....	57
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Gradasi Pasir Lumajang.....	58
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Densitas dan Penyerapan Air Limbah GFRP.....	59
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Gradasi Limbah GFRP.....	61
Tabel 4. 9 Hasil Analisis Material <i>Fly ash</i> PLTU Paiton	63
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian XRF Limbah GFRP	64
Tabel 4. 11 Hasil Uji TCLP	73
Tabel 4. 12 Hasil Uji Normalitas.....	74
Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Homogenitas	75
Tabel 4. 14 Hasil Pengujian Manova	75
Tabel 4. 15 Hasil Pengujian Bata Beton Berdasarkan Standar Mutu.....	81

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Bongkahan Limbah GFRP	10
Gambar 2. 2 Hierarki Pengelolaan Limbah (Qureshi, 2022)	11
Gambar 2. 3 Metode Daur Ulang (Gopalraj dan Kärki, 2020)	11
Gambar 2. 4 Siklus PLTU (Alfarisyi dkk., 2022)	13
Gambar 2. 5 Partikel abu terbang pada perbesaran 2.000x (FHWH, 2003)	13
Gambar 2. 6 Contoh Bentuk dari (a) Bata Beton Pejal; (b) Bata Beton Berlubang.	17
Gambar 2. 7 Semen (Sumber : Internet)	21
Gambar 2. 8 Perawatan Beton (Sumber : Internet)	24
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	34
Gambar 4. 1 Grafik Distribusi Partikel <i>Fly ash</i> PLTU Paiton dan Semen PCC ...	55
Gambar 4. 2 Grafik Gradasi Pasir Lumajang.....	59
Gambar 4. 3 Grafik Gradasi Limbah GFRP.....	62
Gambar 4. 4 Penyerapan Air Bata Beton	67
Gambar 4. 5 Densitas Bata Beton	70
Gambar 4. 6 Grafik Kuat Tekan Bata Beton	71
Gambar 4. 7 Hubungan Densitas terhadap Penyerapan Air Bata Beton	77
Gambar 4. 8 Hubungan Densitas Terhadap Kuat Tekan Bata Beton	78

Halaman sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut data statistik Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) pada Tahun 2024 terdapat 1.171.356 unit kapal yang didominasi oleh kapal dengan massa kurang dari 5 GT (*Gross Tonnage*) sebanyak 808.831 unit kapal. Seiring dengan perkembangan teknologi pembuatan kapal, bahan yang digunakan terus berevolusi dari material kayu menjadi material berbahan *fiberglass reinforced plastic* (GFRP) sebagai alternatif modern (Saputra dkk., 2022). Hal ini disebabkan karena terjadinya kelangkaan material kayu sebagai bahan dasar pembuatan kapal, sehingga GFRP dapat menjadi alternatif yang lebih menguntungkan daripada menggunakan material kayu (Ardhy dkk., 2019).

GFRP merupakan komposit yang terdiri dari bahan penguat berupa serat *fiberglass*, resin, serta bahan tambahan berupa katalis yang digabungkan agar diperoleh kinerja yang memberikan kekuatan dan kekakuan (Qureshi, 2022). Plastik dikategorikan menjadi termoset dan termoplastik, resin termasuk dalam golongan plastik termoset. Menurut Chawla (2012), FRP berjenis E *glass* terdiri dari SiO₂ 55,2%, Al₂O₃ 8,0%, CaO 18,7%, MgO 4,6%, Na₂O 0,3%, dan K₂O 0,2%. Penelitian yang dilakukan oleh Sari dkk. (2022), terdapat kandungan logam berat seperti Zn (seng), Mn (mangan), dan Pb (timbal) pada *glassfiber* berjenis E *glass non dental*. Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran IX sisa dari hasil pembuatan dan perawatan kapal merupakan residu proses produksi yang meliputi *manufacturing*, perakitan dan pemeliharaan yang termasuk dalam limbah B3 dengan kode A323-3. Selain itu, pada Lampiran XI PP Nomor 22 Tahun 2021 terdapat baku mutu yang mengatur kadar logam berat pada limbah.

Timbulan limbah GFRP dari galangan kapal pada Tahun 2025 diprediksi mencapai 70.000 ton dan timbulan yang berasal dari sektor transportasi lainnya sebanyak 88.000 ton (Gonçalves dkk., 2022). Tahapan penting dalam pengelolaan limbah FRP adalah dengan melakukan pemilahan berdasarkan bentuk, seperti bentuk lempengan, fragmen, serta campuran bahan FRP (Irwan, 2025). Hierarki

pengolahan limbah GFRP meliputi pengurangan (*reduce*), penggunaan kembali (*reuse*), daur ulang (*recycle*), insenerasi, serta penimbunan di *Landfill* (TPA) (Qureshi, 2022).

Daur ulang limbah komposit GFRP merupakan alternatif dapat dipilih selain melakukan pembuangan ke TPA dan pembakaran menggunakan metode insinerasi. Metode daur ulang yang umum digunakan untuk mendaur ulang limbah GFRP yaitu metode mekanis, termal, dan kimia. Metode pengolahan mekanis menjadi alternatif pengolahan karena biaya investasi yang diperlukan lebih rendah dan lebih sederhana daripada menggunakan metode lainnya. Selain itu, pengolahan secara mekanis dapat menghasilkan ukuran dan bentuk limbah yang lebih beragam (Tao et al., 2023). Penggunaan limbah GFRP dalam mortar dan beton menunjukkan potensinya untuk diterapkan secara luas sebagai solusi hemat biaya dan berkelanjutan (Kaboré dkk., 2025).

Berdasarkan penelitian Aziz dkk. (2023) penggantian agregat halus dengan limbah GFRP pada campuran beton sebesar 5% dari jumlah agregat halus dapat meningkatkan kuat tekan beton sebesar 45 MPa setelah dilakukan perawatan (*curing*) selama 28 hari. Namun, penelitian yang dilakukan oleh Bitouri dkk. (2024) mengalami penurunan kuat tekan pada substitusi 15% limbah FRP menghasilkan penurunan kuat tekan sebesar 54%. Menurut Thomoglou dkk. (2022) penurunan kekuatan pada beton terjadi karena limbah GFRP memiliki sifat hidrofobik dan tidak dapat menyatu dengan pasta semen. Sehingga diperlukan bahan tambah yang dapat meningkatkan ikatan antar material, salah satu bahan tambah yang dapat digunakan adalah *fly ash*.

Fly ash (abu terbang) dihasilkan dari pembakaran batu bara dalam suatu boiler yang berupa partikel halus sehingga terbawa oleh gas buang dan akan dikumpulkan melalui unit ESP (*Electrostatic Precipitator*) (Suraneni dkk., 2021). Penggunaan material *fly ash* sebagai campuran pembentuk beton didasari pada sifatnya yang hampir mirip dengan sifat semen yakni *pozzolanic*. (Usman, 2024). Pozolan adalah bahan silika atau bahan silika dan alumina, yang dalam bentuk yang sangat halus dan dengan adanya air, bereaksi dengan kalsium hidroksida pada suhu biasa untuk menghasilkan senyawa semen (FHWH, 2003). Abu terbang mengandung berbagai senyawa kimia utama, seperti silika dioksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3),

karbon, besi oksida (Fe_2O_3), sulfur trioksida (SO_3), serta senyawa lainnya (Hamdi dkk., 2022). Menurut FHWH (2003), *fly ash* dapat dimanfaatkan sebagai beton, stabilisasi lapis fondasi agregat, timbunan struktural, stabilitas tanah, serta bahan pengisi campuran aspal.

Bata beton (batako) adalah salah satu bahan bangunan yang terbuat dari campuran air, semen *Portland* serta agregat yang umumnya digunakan sebagai pasangan dinding pada suatu bangunan. Material ini memiliki dua jenis, yaitu bata beton pejal dan bata beton berlubang (BSN, 1989). Bata beton memiliki keunggulan dalam hal waktu pemasangan dan dapat mengurangi penggunaan acian pada dinding, sehingga dapat lebih mengemat biaya tukang dan material apabila dibandingkan dengan bata merah (Antika dkk., 2023). Pemanfaatan kembali limbah industri, pertanian, serta limbah lainnya dapat menjadi solusi dalam pengolahan limbah. Hal ini sejalan dengan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan yang menekankan pertumbuhan aspek ekonomi tanpa mengurangi perhatian terhadap aspek lingkungan (Nurhadi dkk., 2024). Setiap 10% pemanfaatan limbah FRP sebagai agregat halus pada campuran beton, dapat menghemat penggunaan pasir secara signifikan (Kaboré dkk., 2025).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh substitusi limbah GFRP dengan komposisi 2,5%, 5%, dan 7,5% sebagai agregat halus serta substitusi 30% *fly ash* dari berat semen pada bata beton pejal terhadap densitas mengacu pada ASTM C-55 dan daya serap air maksimum serta kuat tekan berdasarkan SNI 03-0348-1989 (pasca *curing* 28 hari), dan pengujian *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) pada variasi terbaik yang selanjutnya dapat dibandingkan dengan baku mutu pada PP Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran XI untuk dievaluasi potensi keberlanjutan pemanfaatan limbah GFRP kapal pada bata beton pasangan dinding.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang disajikan pada latar belakang, penelitian ini mengemukakan rumusan masalah sebagai berikut.

- 1) Bagaimana pengaruh variasi substitusi substitusi limbah GFRP dan *fly ash* terhadap penyerapan air, densitas, dan kuat tekan pada bata beton?

- 2) Bagaimana kelayakan lingkungan terhadap substitusi limbah GFRP dan *fly ash* melalui pengujian TCLP?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut.

- 1) Menganalisis pengaruh variasi substitusi limbah GFRP dan *fly ash* terhadap kuat tekan, densitas, dan daya serap air pada bata beton.
- 2) Menganalisis kelayakan lingkungan terhadap substitusi limbah GFRP dan *fly ash* terbaik melalui pengujian TCLP.

1.4 Manfaat

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penelitian ini diharapkan memiliki manfaat sebagai berikut.

- 1) Bagi Akademisi
 - a) Menjadi sarana dalam mengimplementasikan ilmu pengolahan limbah dalam upaya pemanfaatan limbah GFRP sebagai bata beton.
 - b) Menjadi referensi pemanfaatan limbah GFRP sebagai agregat halus.
- 2) Bagi Perusahaan atau Masyarakat
 - a) Mengurangi timbulan limbah GFRP pada Bengkel Kayu PPNS.
 - b) Menjadi alternatif agregat halus yang bernilai ekonomi.
 - c) Menjadi opsi bahan bangunan yang ramah lingkungan.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari tugas akhir sebagai berikut.

1. Limbah GFRP yang digunakan berasal dari Bengkel Kayu Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) yang digiling halus dan lolos ayakan 4,75 mm.
2. *Fly ash* berasal dari PLTU Paiton.
3. Perawatan beton dilakukan selama 28 hari menggunakan karung goni basah.
4. Bata beton dengan ukuran 30 x 15 x 10 cm yang mengacu pada SNI 03-0349-1989

5. Pengujian TCLP dilakukan pada variasi 7,5% limbah GFRP dan 30% *fly ash*.

Halaman sengaja dikosongkan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)

Limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) adalah sisa suatu usaha atau kegiatan yang mengandung zat, energi, atau komponen lain yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya baik secara langsung maupun tidak langsung dapat mencemarkan, merusak, dan membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain (Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021). Hampir semua industri menghasilkan limbah B3, jenis limbah B3 yang dihasilkan meliputi logam berat, sianida, pestisida, cat, minyak, pelarut serta bahan kimia lainnya. Apabila tidak dikelola dengan tepat, limbah ini memiliki potensi kerusakan yang tinggi terhadap lingkungan (Nursabrina dkk., 2021). Berikut merupakan karakteristik limbah B3 menurut PP 22 Tahun 2021.

a. Mudah Meledak

Limbah mudah meledak merupakan salah satu dari karakteristik limbah B3. Limbah kategori ini dapat meledak pada suhu dan tekanan standar 25°C atau 760 mmHg. Selain itu dapat menghasilkan gas melalui reaksi kimia atau fisika pada suhu dan tekanan tinggi dengan cepat dapat merusak lingkungan sekitarnya.

b. Mudah Menyala

Limbah B3 bukan cairan dapat dikategorikan bersifat mudah menyala ketika pada temperatur dan tekanan standar yaitu 25°C atau 760 mmHg mudah menyala melalui gesekan, penyerapan uap air atau perubahan kimia secara spontan dan jika menyala dapat menyebabkan nyala terus menerus.

c. Reaktif

Limbah reaktif merupakan limbah yang memiliki salah satu atau beberapa dari sifat berikut.

- 1) Limbah yang pada keadaan normal tidak stabil dan dapat menyebabkan perubahan tanpa peledakan.

- 2) Limbah yang dapat menyebabkan ledakan, menghasilkan gas, uap, atau asap ketika bercampur dengan air.
- 3) Limbah sianida, sulfida yang pada kondisi pH antara 2 (dua) dan 12,5 (dua belas koma lima) dapat menghasilkan gas, uap, atau asap beracun.

d. Infeksius

Limbah bersifat infeksius yaitu limbah medis padat yang terkontaminasi organisme patogen yang tidak secara rutin ada di lingkungan, dan organisme tersebut dalam jumlah dan virulensi yang cukup untuk menularkan penyakit pada manusia rentan. Yang termasuk ke dalam Limbah infeksius antara lain.

- 1) Limbah yang berasal dari perawatan pasien yang memerlukan isolasi penyakit menular atau perawatan intensif dan Limbah laboratorium;
- 2) Limbah yang berupa benda tajam seperti jarum suntik, perlengkapan intravena, pipet pasteur, dan pecahan gelas;
- 3) Limbah patologi yang merupakan limbah jaringan tubuh yang terbuang dari proses bedah atau otopsi;
- 4) Limbah yang berasal dari pembiakan dan stok bahan infeksius, organ binatang percobaan, bahan lain yang telah diinokulasi, dan terinfeksi atau kontak dengan bahan yang sangat infeksius; dan/atau
- 5) Limbah sitotoksik yaitu Limbah dari bahan yang terkontaminasi dari persiapan dan pemberian obat sitotoksik untuk kemoterapi kanker yang mempunyai kemampuan membunuh atau menghambat pertumbuhan sel hidup.

e. Korosif

Limbah korosif adalah limbah yang memiliki salah satu atau lebih sifat-sifat berikut.

- 1) Limbah dengan pH sama atau kurang dari 2 (dua) untuk Limbah bersifat asam dan sama atau lebih besar dari 12,5 (dua belas koma lima) untuk yang bersifat basa. Sifat korosif dari Limbah padat dilakukan dengan mencampurkan Limbah dengan air sesuai

dengan metode yang berlaku dan jika limbah dengan pH lebih kecil atau sama dengan 2 (dua) untuk Limbah bersifat asam dan pH lebih besar atau sama dengan 12,5 (dua belas koma lima) untuk yang bersifat basa; dan/atau

- 2) Limbah yang menyebabkan tingkat iritasi yang ditandai dengan adanya kemerahan atau eritema dan pembengkakan atau edema. Sifat ini dapat diketahui dengan melakukan pengujian pada hewan uji mencit dengan menggunakan metode yang berlaku.

f. Beracun

Limbah beracun adalah limbah yang memiliki karakteristik beracun berdasarkan uji penentuan karakteristik beracun melalui TCLP, Uji Toksikologi LD₅₀, dan uji sub-kronis.

2.2 Limbah GFRP (*Glass fiberglass reinforced plastic*)

Komposit FRP merupakan material anisotropik yang tersusun atas matriks resin dan penguat berupa serat. Berdasarkan jenis serat penyusunannya, terdapat empat kelompok utama komposit FRP dalam bidang rekayasa sipil, antara lain *carbon*, *glass*, *aramid*, dan *basalt* (CFRP, GFRP, ARFP, dan BFRP) (Tao dkk., 2023). Material ini tersusun dari serat kaca yang terdispersi di dalam matriks resin, misalnya poliester. GFRP banyak digunakan diberbagai sektor, seperti kontruksi, energi terbarukan, serta industri perkapalan (Bitouri dkk., 2024). Menurut Chawla (2012), serat kaca umumnya berbasis silika (50-60% SiO₂) dan mengandung berbagai oksida lainnya, seperti kalsium, boron, natrium, alumunium, serta besi.

Tabel 2. 1 Perkiraan komposisi kimia beberapa serat kaca (wt.%)

Komposisi	E Glass	C Glass	S Glass
SiO ₂	55,2	65,0	65,0
Al ₂ O ₃	8,0	4,0	25,0
CaO	18,7	14,0	-
MgO	4,6	3,0	10,0
Na ₂ O	0,3	8,5	0,3
K ₂ O	0,2	-	-
B ₂ O ₃	7,3	5,0	-

Sumber: Chawla, 2012

Pada Tabel 2.1 dapat diketahui komposisi dari komposit yang umum digunakan. Kode “E” merujuk pada elektrik, karena *Glass E* memiliki sifat isolator listrik, kekuatan mekanik, dan modulus young yang baik; Kode “C” menandakan bahwa serat tahan terhadap korosi; Sedangkan kode “S” mengindikasikan bahwa kandungan silika pada serat tinggi, sehingga tahan terhadap suhu tinggi. Limbah GFRP pada industri perkapalan disajikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Bongkahan Limbah GFRP

Penambahan limbah GFRP ke dalam mortar dan beton memberikan hasil yang menjanjikan di beberapa aspek, sehingga berpotensi menjadi solusi ramah lingkungan dan hemat biaya untuk berbagai pangaplikasian (Kaboré dkk., 2025). Meskipun penelitian terkini telah mengeksplorasi pengaruh daur ulang limbah GFRP pada beton, temuan dari studi-studi sebelumnya belum dikompilasi dan dianalisis secara sistematis (Tao dkk., 2023).

2.3 Metode Daur Ulang Limbah FRP

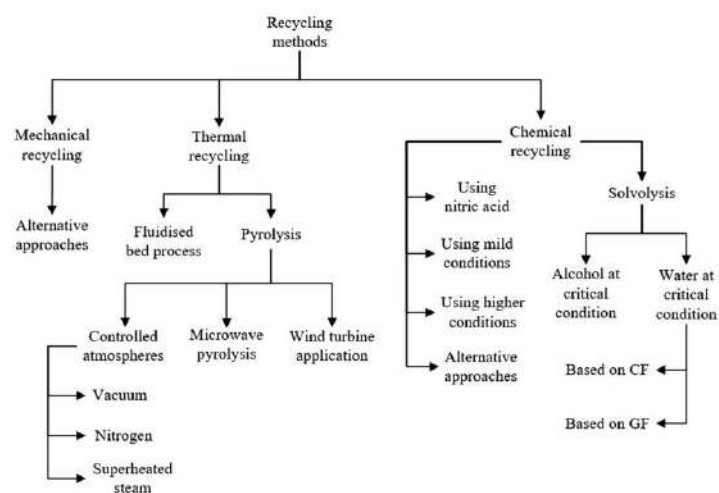
Berbagai metode daur ulang telah dikembangkan, antara lain daur ulang secara mekanis, termal, dan kimia. Pemilihan teknologi daur ulang dipengaruhi oleh beberapa faktor, terutama sifat matriks material serta tujuan pemanfaatan kembali material (Kaboré dkk., 2025). Menurut hierarki pengelolaan limbah, pilihan untuk FRP pengelolaan limbah berdasarkan urutan preferensi adalah: pengurangan

limbah, penggunaan kembali, daur ulang, pembakaran dengan pemulihan energi/pengomposan, dan terakhir pembakaran tanpa pemulihan energi/pembuangan ke tempat pembuangan akhir (Halliwell, 2010). Dalam pengelolaan limbah yang berkelanjutan, langkah yang kemudian diprioritaskan adalah upaya untuk penggunaan kembali dan pengalihan fungsi komponen komposit (Qureshi, 2022). Hierarki pengolahan limbah GFRP disajikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Hierarki Pengelolaan Limbah (Qureshi, 2022)

Menurut Tao dkk. (2023), terdapat berbagai metode yang dapat digunakan untuk mendaur ulang limbah GFRP. Metode-metode tersebut disajikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Metode Daur Ulang (Gopalraj dan Kärki, 2020)

a. Daur Ulang Mekanis

Daur ulang mekanis adalah metode yang memecahkan limbah FRP menjadi potongan-potongan menjadi berukuran kecil agar dapat digunakan kembali. Bagian komposit daur ulang dapat diolah menjadi beragam bentuk dan ukuran dengan memanfaatkan peralatan seperti siklon dan ayakan. Daur ulang secara mekanis merupakan salah satu teknik yang paling banyak digunakan karena prosesnya relatif sederhana dan memerlukan investasi peralatan yang rendah.

b. Daur Ulang Termal

Pirolisis merupakan salah satu metode daur ulang termal, di mana ikatan antara matriks dan serat diuraikan dalam kondisi tanpa oksigen. Apabila dibandingkan dengan metode mekanis, proses pirolisis ini mampu memulihkan serat-serat yang lebih panjang (sekitar 6-60 mm) dan relatif bersih dari limbah melalui mekanisme degradasi termal.

c. Daur Ulang Secara Kimia

Solvolisis merupakan proses pemisahan serat dari material komposit dengan menggunakan pelarut kimia yang dikombinasikan dengan katalis atau aditif untuk menguraikan ikatan matriks pada tekanan dan suhu tertentu.

2.4 Boiler

Secara umum, boiler merupakan peralatan yang menghasilkan uap atau steam. Uap pada suhu dan tekanan tertentu selanjutnya dimanfaatkan untuk mentransfer energi ke suatu proses. Steam menjadi media yang efisien dan ekonomis untuk mengalirkan panas ke suatu proses (Alfarisyi dkk., 2022). Boiler yang menggunakan sumber panas dari bahan bakar batubara, batubara merupakan salah satu sumber energi primer di dunia (Putra dkk., 2021). Pembangkit listrik tenaga batu bara melepaskan gas rumah kaca seperti CO₂ dan N₂O dalam jumlah besar dibandingkan dengan pembangkit listrik jenis lainnya, di mana gas-gas tersebut berasal dari kandungan batu bara dan selanjutnya dilepaskan ke lingkungan melalui residu pembakaran berupa *fly ash* dan *bottom ash*, sehingga kondisi ini perlu untuk ditangani secara bijaksana melalui upaya pencegahan berupa

- b. Mengurangi panas hidrasi, permeabilitas, dan susut beton.
- c. Meningkatkan ketahanan terhadap efek sulfat dan reaktivitas alkali-silika (ASR).
- d. Menurunkan biaya produksi beton.

Fly ash memiliki berbagai warna, mulai dari coklat muda hingga abu-abu gelap, bergantung pada kandungan kimia dan mineralnya. Warna coklat muda atau terang umumnya berkaitan dengan kadar kapur yang tinggi, sedangkan warna kecokelatan biasanya dipengaruhi oleh kandungan besi (FHWH, 2003). Persyaratan sifat kimia *fly ash* disajikan pada Tabel 2.2 dan persyaratan sifat fisik *fly ash* disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 2 Persyaratan Sifat Kimia *Fly ash*

Keterangan	Kelas N	Kelas F	Kelas C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (min.%)	70	50	50
CaO (%)	<i>Report only</i>	18 maks.	>18
SO ₃ (maks. %)	4	5	5
Moisture Content (maks. %)	3	3	3
Loss on ignition (maks. %)	10	6	6

Sumber : ASTM C618-22

Tabel 2. 3 Persyaratan Sifat Fisik (ASTM C618-22)

Keterangan	Kelas N	Kelas F	Kelas C
Kehalusan (maks %)	34	34	34
Indeks Kekuatan 7 hari (min %)	75	75	75
Indeks Kekuatan 28 hari (min %)	75	75	75
Kebutuhan Air (maks %)	115	105	105
Variasi Densitas Rata-Rata (%)	5	5	5
Persentase Tertahan 45 μm (variasi terbaik, % rata-rata)	5	5	5

Sumber : ASTM C618-22

2.6 Solidifikasi

Solidifikasi/stabilisasi (S/S) adalah proses pencampuran bahan kimia pengolah ke dalam bahan yang terkontaminasi untuk menimbulkan perubahan fisik dan/atau kimia, sehingga mengurangi dampak lingkungan dari air yang telah terkontaminasi limbah terhadap air tanah atau air permukaan (Al-Kindi, 2019). Menurut Anrozi

dan Trihadiningrum (2017), metode dan mekanisme solidifikasi/stabilisasi terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

a. Metode solidifikasi/stabilisasi

1) Kapsulasi makro

Kapsulasi makro adalah teknik membungkus limbah B3 dengan selubung yang inert dan kedap air. Bahan pembungkus biasanya berupa campuran *fiberglass*, resin epoksi, dan poliuretan. Limbah B3 tertahan dalam matriks yang terbentuk oleh material stabilisasi, sehingga umum diterapkan pada limbah berbahaya yang berupa potongan-potongan.

2) Kapsulasi mikro

Kapsulasi mikro melibatkan pencampuran limbah dengan bahan pembungkus sebelum proses pemadatan selesai. Limbah B3 terperangkap dalam struktur kristalin matriks yang tersolidifikasi pada skala mikroskopis. Banyak limbah B3 yang mengalami degradasi menjadi partikel berukuran kecil; metode ini efektif untuk tanah yang tercemar hidrokarbon.

3) Kapsulasi termoplastik

Kapsulasi termoplastik atau kapsulasi polimer menggunakan polimer termoplastik untuk mensolidifikasi limbah B3 secara efektif dan aman. Metode ini cocok untuk limbah yang mengandung halida, serta limbah organik padat seperti resin, plastik, dan tar.

4) Vitrifikasi

Vitrifikasi mengubah limbah menjadi kaca atau bahan kristalin dengan pemanasan, umumnya pada suhu sekitar 1.200°C atau lebih. Semua bahan organik dan beberapa senyawa anorganik seperti sianida dan nitrat akan terurai pada suhu tersebut.

5) Solidifikasi/stabilisasi berbasis semen Portland

S/S berbasis semen Portland termasuk teknologi kimia. Semen Portland sangat cocok sebagai bahan pengikat untuk remediasi tanah yang terkontaminasi limbah B3 anorganik, seperti logam berat. Faktor pendukungnya meliputi: komposisi kimia semen Portland yang relatif konsisten; kinerja baik dalam proses setting, pengerasan, dan fiksasi logam;

serta kemampuan semen Portland meniru banyak reaksi pozzolanik yang penting dalam teknologi S/S modern.

6) S/S berbasis pozzolan

S/S berbasis pozzolan juga merupakan teknologi kimia. Pozzolan adalah bahan alami atau buatan yang sebagian besar mengandung silika dan alumina. Metode ini dapat diaplikasikan untuk remediasi tanah tercemar limbah B3 pada kondisi pH rendah karena kemampuan pozzolan menetralkan keasaman.

b. Mekanisme solidifikasi/stabilisasi

1) Adsorpsi

Limbah B3 dapat diikat secara fisik oleh bahan penyerap. Bahan absorben biasanya dipakai untuk menyerap limbah cair agar lebih mudah ditangani, sehingga pemakaiannya bersifat sementara.

2) Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses di mana kontaminan terikat secara elektrokimia pada agen stabilisasi dalam matriks, misalnya melalui ikatan hidrogen. Kontaminan yang teradsorpsi secara kimia pada matriks stabilisasi lebih sulit lepas ke lingkungan dibandingkan kontaminan yang tidak teradsorpsi.

3) Mekanisme pengikatan oleh semen

Semen sering digunakan sebagai bahan pengikat dalam S/S. Saat semen dicampur dengan air, kalsium silikat terurai menjadi silikat bermuatan dan ion kalsium. Ion silikat bermuatan ini bergabung membentuk lapisan tipis pada permukaan partikel semen yang mengurangi interaksi permukaan semen dengan air, sehingga memperlambat pelepasan ion-ion tersebut.

2.7 Bata Beton

Beton merupakan bahan komposit yang terdiri dari campuran semen sebagai bahan utama, serta bahan pendukung seperti agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambahan jika diperlukan dengan komposisi tertentu (Hamdi dkk., 2022). Perkembangan infrastruktur berjalan semakin pesat, sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan kinerja beton dari segi mutu serta metode penerapannya (Rajiman, 2020). Kualitas mutu beton dapat dikatakan baik apabila bahan-bahan

yang digunakan berkualitas, diproses dengan pengadukan yang homogen, pelaksanaan kerja tepat, alat yang digunakan memadai, serta memiliki porositas rendah (Hamdi dkk., 2022).

Bata beton atau batako merupakan material yang terbuat dari campuran semen, air, pasir (agregat halus), dan dengan atau tanpa bahan campuran (Harahap, 2021). Bata beton merupakan material penyusun dinding non-struktural, meskipun bersifat non-struktural tetap harus memenuhi standar dan toleransi dimensi tertentu (Kurniwanto, 2020). Dinding yang terbuat dari bata beton juga dapat meredam suara dan panas serta memperingan beban struktur pada suatu bangunan (Rilya & Sudarno, 2020). Selain itu, juga terdapat beberapa keunggulan bata beton, yaitu praktis, kemudahan dalam pemasangan, kuat tekan yang lebih baik, serta harga yang ekonomis (Kurniwanto, 2020).

2.7.1 Jenis dan Klasifikasi Bata Beton

Berdasarkan SNI 03-0348-1989, bata beton dibedakan menjadi bata beton pejal dan bata beton berlubang. Bata beton pejal adalah bata dengan penampang pejal minimal 75% dari luas total dan volume pejal lebih dari 75% dari volume bata keseluruhan sebagaimana yang disajikan pada Gambar 2.6 (a). Bata beton berlubang merupakan bata yang memiliki luas penampang dan volume lubang lebih dari 25% secara keseluruhan sebagaimana disajikan pada Gambar 2.6(b).



(a)



(b)

Gambar 2. 6 Contoh Bentuk dari (a) Bata Beton Pejal; (b) Bata Beton Berlubang. (Sumber : Internet)

Mengacu pada ASTM C-55 bata beton dapat diklasifikasikan sebagai berikut.

- a. *Lightweight* memiliki densitas 1680 kg/m^3 .
- b. *Medium Wight* memiliki densitas $1680 - 2000 \text{ kg/m}^3$
- c. *Normal Weight* memiliki densitas 2000 kg/m^3 atau lebih.

Menurut PUBI-1982, bata beton pejal dan bata beton berlubang diklasifikasikan menjadi 4 peruntukan, yaitu:

- a. Bata beton mutu A1
Bata beton mutu A1 hanya digunakan untuk konstruksi yang tidak memikul beban, dinding penyekat, dan lain-lainnya serta konstruksi yang terlindung dari cuaca luar.
- b. Bata beton mutu A2
Bata beton mutu A2 adalah bata beton yang digunakan untuk konstruksi sebagaimana pada mutu A1, hanya saja permukaan dinding konstruksi dari bata beton tersebut boleh tidak diplester
- c. Bata beton mutu B1
Bata beton mutu B1 merupakan bata beton yang dapat digunakan untuk memikul beban tetapi penggunaannya hanya untuk konstruksi yang terlindung dari cuaca luar (di bawah atap).
- d. Bata beton mutu B2
Bata beton mutu B2 adalah bata beton yang dapat digunakan untuk memikul beban dan dapat digunakan pada konstruksi yang tidak terlindungi dari cuaca.

2.7.2 Syarat Mutu Bata Beton

ASTM C-55 adalah acuan yang digunakan dalam menentukan klasifikasi densitas bata beton. Syarat mutu bata beton berdasarkan ASTM C-55 disajikan pada tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Syarat Mutu Klasifikasi Bata Beton Berdasarkan Densitas

Klasifikasi Densitas	Densitas Kering dari Beton (kg/m ³)	Penyerapan Air Maksimum (kg/m ³)		Kuat Tekan Minimum (kg/m ³)	
	Rata – rata dari 3 benda uji	Rata – rata dari 3 benda uji	Tiap benda uji	Rata – rata dari 3 benda uji	Tiap benda uji
<i>Lightweight</i>	1600	288	320	17,2	13,8
<i>Medium Wight</i>	1600 - 2000	240	272	17,2	13,8
<i>Normal Wight</i>	2000 atau lebih	208	240	17,2	13,8

Sumber : ASTM C-55

Untuk menentukan klasifikasi bata beton berdasarkan peruntukannya dapat mengacu pada SNI 03-0348-1989 yang disajikan pada tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Syarat Mutu Klasifikasi Peruntukan Bata Beton

Syarat Fisis	Satuan	Tingkat mutu bata beton pejal				Tingkat mutu bata beton pejal			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
Kuat tekan bruto* rata-rata min.	kg/cm ²	100	70	40	25	70	50	35	20
Kuat tekan bruto masing-masing benda uji min.	kg/cm ²	90	65	35	21	65	45	30	17
Penyerapan air rata-rata maks.	%	25	35	-	-	25	35	-	-

Sumber : SNI 03-0349-1989

2.8 Bahan Penyusun Bata Beton

2.8.1 Agregat Halus

Agregat halus adalah salah satu bahan penyusun beton yang berupa pasir alam yang berasal dari pelapukan batuan yang berfungsi sebagai pengikat agregat kasar (Putri dkk., 2023). Agregat halus berperan sebagai bahan pengisi berupa pasir dengan ukuran butir yang umumnya berada di antara lolos saringan nomor 4 hingga nomor 100 (Rajiman, 2020). Menurut PBI-71, terdapat beberapa ketentuan yang harus dipenuhi, antara lain.

- Agregat halus untuk beton dapat berupa pasir alam sebagai desintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat-alat pemecah batu. Sesuai dengan syarat-syarat pengawasan mutu agregat untuk berbagai mutu beton, maka agregat halus harus memenuhi satu, beberapa atau semua ayat berikut ini.

- b. Agregat halus terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras. Butir-butir agregat halus harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- c. Agregat halus tidak boleh mengandung lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering). Yang diartikan dengan lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0,063 mm. Apabila kadar lumpur melampaui 5% maka agregat halus harus dicuci.
- d. Agregat halus tidak boleh mengandung bahan-bahan organik terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrams Harder (dengan larutan NaOH). Agregat halus yang tidak memenuhi percobaan warna ini dapat juga dipakai, asal kekuatan tekan adukan agregat tersebut pada umur 7 dan 28 hari tidak kurang dari 95% dari kekuatan agregat yang sama tetapi dicuci hingga bersih dengan air, pada umur yang sama.
- e. Agregat halus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan, harus memenuhi syarat-syarat :
 - 1) Sisa di atas ayakan 4 mm, harus minimum 2% berat
 - 2) Sisa di atas ayakan 4 mm, harus minimum 10% berat
 - 3) Sisa di atas ayakan 0,25 mm, harus berkisar antara 80% dan 95% berat.
- f. Pasir laut tidak boleh dipakai sebagai agregat halus untuk semua mutu beton, kecuali dengan petunjuk- petunjuk dari lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang diakui.

2.8.2 Semen Portland

Bahan utama dari semen *portland* adalah kapur yang kaya akan kalsium sebagai sumber utama oksida kapur (CaO), serta tanah liat yang mengandung senyawa silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), dan besi oksida (Fe₂O₃) (Panennungi dan Pertiwi, 2019). Semen berfungsi sebagai bahan pengikat yang menyatukan butir agregat halus dan agregat kasar menjadi satu, sekaligus mengisi rongga diantara butiran agregat tersebut sebagaimana yang disajikan pada Gambar 2.7 (Hamdi dkk., 2022).



Gambar 2. 7 Semen (Sumber : Internet)

Menurut Hamdi dkk. (2022), pada umumnya jenis semen yang digunakan dipasaran, antara lain.

a. *Portland Pozzolan Cement (PPC)*

Jenis semen ini digunakan untuk rumah tinggal, bangunan struktur, bendungan, saluran irigasi, bangunan pantai, bangunan area rawa atau gambut, konstruksi dengan tingkat panas hidrasi sedang, serta berbagai pekerjaan lain seperti pemasangan batu, plesteran dinding, tegel, dan pasta semen.

b. *Portland Composite Cement (PCC)*

Semen ini banyak digunakan pada bangunan dan dapat dipakai untuk berbagai mutu beton, misalnya pada perumahan, gedung bertingkat, jembatan, serta pengaplikasian lainnya.

Berdasarkan analisis yang dilakukan oleh Irawan dkk. (2017) dengan menggunakan 11 sampel semen yang berasal dari berbagai merek, sifat kimia semen rata-rata disajikan pada Tabel 2.6 dan sifat fisik semen rata-rata disajikan pada Tabel 2.7 .

Tabel 2. 6 Sifat Kimia Semen Rata-Rata

No.	Uraian	Nilai Rata-Rata (%)
1.	Bagian tak larut	6,86
2.	SiO ₂	22,03
3.	Fe ₂ O ₃	3,55
4.	Al ₂ O ₃	6,96
5.	CaO	58,55
6.	MgO	1,16

No.	Uraian	Nilai Rata-Rata (%)
7.	SO ₃	2,01
8.	Hilang pada pemijaran	5,75
9.	Na ₂ O	0,46
10.	Kapur bebas	1,05

Sumber : Irawan dkk., 2017

Tabel 2. 7 Sifat Fisika Semen Rata – Rata

No.	Uraian	Nilai Rata-Rata
1.	Kehalusan dengan alat Blaine, m ² /kg	350,55
2.	Waktu pengikatan dengan alat vicat, awal, menit	147,73
3.	Waktu pengikatan dengan alat vicat, akhir, menit	221,36
4.	Kekekalan bentuk dengan Autoclave, Pemuaian, %	0,05
5.	Pengikatan semu, Penetrasi akhir, %	78,20
6.	Kandungan udara dalam mortar, %	6,67
7.	Berat jenis, g/cm ³	3,00

Sumber : Irawan dkk. 2017

2.8.3 Air

Air berfungsi sebagai pemicu reaksi kimia pada semen dan membasahi agregat serta mempermudah dalam pengerjaan beton. Air minum dapat digunakan pada campuran beton, sedangkan air yang tercemar oleh zat berbahaya dapat menurunkan mutu beton (Kurniwanto, 2020). Kadar air dapat memengaruhi kuat tekan beton, hal tersebut disebabkan karena penggunaan air berlebih dapat menurunkan kekuatan pada beton dan menyebabkan *bleending* (kondisi ketika air semen naik ke permukaan beton saat baru saja dituang) pada beton (Hamdi dkk., 2022). Komposisi beton pada dasarnya ditentukan oleh faktor air semen (FAS), jenis semen dan agregat, serta kandungan semen dan agregat. Semakin tinggi FAS dan kandungan semen, semakin besar rangkaknya. Sebaliknya, penggunaan agregat yang lebih banyak akan mengurangi susut secara signifikan (Farizal dkk., 2023). Secara umum, nilai faktor air semen minimum untuk beton normal berkisar sekitar 0,4, sedangkan nilai maksimumnya mencapai 0,65 (Pah dkk., 2022).

2.8.4 Bahan Tambah Beton (Aditif)

Aditif merupakan bahan yang ditambahkan ke dalam campuran beton saat atau selama pengadukan berlangsung dengan tujuan untuk mengubah sifat

beton agar sesuai dengan kebutuhan tertentu atau untuk menghemat biaya (Panennungi dan Pertiwi, 2019). Menurut ASTM C494, bahan tambah kimia sebagai campuran beton memiliki 7 tipe, antara lain.

a. Tipe A (*Water Reducing Admixture*)

Water Reducing Admixture adalah bahan tambah yang digunakan untuk mengurangi kebutuhan agar dapat mencapai konsistensi tertentu.

b. Tipe B (*Retarding Admixture*)

Retarding Admixture adalah bahan tambah yang dapat memperlambat waktu pengikatan beton.

c. Tipe C (*Accelerating Admixture*)

Accelerating Admixture adalah bahan tambah yang dapat mempercepat proses pengikatan dan pengembangan kuat awal beton.

d. Tipe D (*Water Reducing and Retarding Admixture*)

Merupakan *admixture* yang dapat menurunkan kebutuhan air serta memperlambat proses pengikatan beton.

e. Tipe E (*Water Reducing and Accelerating Admixture*)

Merupakan *admixture* yang dapat menurunkan kebutuhan air serta mempercepat proses pengikatan dan pengembangan kuat beton.

f. Tipe F (*Water Reducing, High Range Admixture*)

Bahan tambah yang mampu menurunkan kebutuhan air pencampur sebesar 12% atau lebih untuk memperoleh *workability* yang tinggi.

g. Tipe G (*Water Reducing, High Range and Retarding Admixture*)

Bahan tambah yang mampu mengurangi kebutuhan air sebesar 12% atau lebih dan memperlambat waktu ikat beton.

2.9 Perawatan Beton

Perawatan (*curing*) beton merupakan proses perawatan yang bertujuan untuk menjaga kelembapan dan suhu beton pasca dilakukan pengecoran agar dapat mencapai kuat tekan dan ketahanan yang lebih optimal (Umar, 2025). Proses perawatan beton memiliki beberapa metode yang dapat dilakukan untuk menjaga agar mutu beton tetap terjaga, ilustrasi perawatan beton disajikan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Perawatan Beton (Sumber : Internet)

Menurut Fernando dan Hunggurami (2023), terdapat beberapa metode perawatan beton yang dapat dilakukan, antara lain.

a. *Water Curing*

Water curing merupakan metode perawatan beton dengan menjaga permukaannya tetap basah untuk mencegah penguapan air. Cara yang digunakan antara lain menyimpan beton di ruang lembap, merendam beton dalam air, menutup permukaan beton dengan karung basah, atau menyiram permukaan beton secara terus-menerus.

b. *Membrane Curing*

Metode ini dilakukan dengan melapisi permukaan beton menggunakan bahan kedap air guna menghambat penguapan air. Bahan pelapis yang digunakan harus aman, tidak beracun, tidak licin, dan tidak merusak beton, seperti lembaran plastik atau membran khusus.

c. *Steam Curing*

Steam curing dilakukan dengan memberikan uap panas pada beton setelah beton dijaga pada suhu 10–30°C selama beberapa jam. Metode ini umum digunakan di daerah bersuhu dingin dan biasanya dilanjutkan dengan water curing setelah 24 jam untuk mencapai kuat tekan optimal pada umur 28 hari.

d. *Curing dengan Sinar Inframerah*

Metode ini dilakukan dengan menyinari beton menggunakan sinar inframerah selama 2–4 jam pada suhu sekitar 90°C. Tujuannya adalah mempercepat proses pengerasan beton sehingga metode ini masih jarang digunakan dalam praktik konstruksi umum.

e. *Curing* Hidrotermal

Curing hidrotermal dilakukan dengan memanaskan cetakan beton pada suhu sekitar 65°C. Metode ini umumnya digunakan pada industri beton pracetak dan jarang diterapkan pada konstruksi konvensional.

f. *Curing Compound*

Metode ini menggunakan bahan kimia khusus yang dilapiskan pada permukaan beton untuk mencegah keluarnya air dari beton. Salah satu bahan yang sering digunakan dalam praktik konstruksi adalah *curing compound* berbasis antisol.

2.10 Pengujian Material dan Benda Uji

2.10.1 Berat Jenis Pasir dan Limbah FRP

Berat jenis kering permukaan jenuh yaitu perbandingan antara berat dari satuan volume agregat (termasuk berat air yang terdapat di dalam rongga akibat perendaman selama (24+4) jam, tetapi tidak termasuk rongga antara butiran partikel) pada suatu temperatur tertentu terhadap berat di udara dari air suling bebas gelembung dalam volume yang sama pada suatu temperatur tertentu (SNI 1970:2008). Berat jenis agregat dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.1.

$$\text{Berat Jenis Kering Permukaan (JKP)} = \frac{S}{(B+S-C)} \quad (2.1)$$

Dengan.

A = berat benda uji kering oven (gram);

B = berat piknometer yang berisi air (gram);

C = berat piknometer dengan benda uji dan air sampai batas pembacaan (gram);

S = berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan (gram).

2.10.2 Gradasi Agregat Halus

Tabel 2. 8 Gradasi Analisis Ayakan Agregat Halus

Ayakan	Persen Lolos (%)
9,5 mm	100
4,75 mm (No. 4)	95 ke 100
2,36 (No. 8)	80 ke 100
1,18 (No. 16)	50 ke 85

Ayakan	Persen Lolos (%)
600	25 ke 60
300	5 ke 30
150	0 ke 10

Sumber : ASTM C-33

Pada Tabel 2.8 agregat halus diklasifikasikan kedalam batas-batas yang dengan mengacu pada ASTM C-33. Ukuran agregat halus sangat memengaruhi kualitas beton secara keseluruhan, gradasi ini dapat diidentifikasi melalui analisis saringan. Dimana ukuran butir yang seragam akan menghasilkan volume pori yang lebih besar, sedangkan apabila ukuran agregat bervariasi maka akan terjadi volume pori yang kecil (Panennungi dan Pertiwi, 2019).

2.10.3 Penyerapan Air

Penyerapan air adalah penambahan berat dari suatu agregat akibat air yang meresap ke dalam pori-pori, tetapi belum termasuk air yang tertahan pada permukaan luar partikel, dinyatakan sebagai persentase dari berat keringnya. Agregat dikatakan “kering” ketika telah dijaga pada suatu temperatur $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ dalam rentang waktu yang cukup untuk menghilangkan seluruh kandungan air yang ada (sampai beratnya tetap) (SNI 1970:2008). Perhitungan penyerapan air pada agregat halus dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.2).

$$\text{Penyerapan air} = \left(\frac{S-A}{A} \right) \times 100\% \quad (2.2)$$

Dengan.

A = Berat benda uji kering oven (gram)

S = Berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan (gram)

2.10.4 Waktu Ikut Semen

Waktu mulai pengerasan diukur menggunakan jarum vicat pada pasta semen dengan kadar air normal. Waktu ikat awal ini tidak boleh kurang dari 45 menit agar proses pengadukan hingga pembentukan benda semen dapat dilakukan dengan memadai. Faktor udara sekitar sangat memengaruhi waktu ikat tersebut, dengan batas minimum 45 menit dan maksimum 375 menit pada suhu rata-rata $23-30^{\circ}\text{C}$ (Panennungi dan Pertiwi, 2019).

2.10.5 XRF (X-Ray Fluorescence)

XRF merupakan metode analisis yang digunakan untuk menentukan komposisi kimia pada berbagai jenis material, baik dalam bentuk padat, cair, serbuk, filtrat, maupun bentuk lainnya. Teknik ini juga dapat dimanfaatkan untuk mengukur etebalan dan komposisi lapisan atau coating tertentu (Brouwer, 2013).

2.10.6 Kuat Tekan

Uji kuat tekan beton dilakukan menggunakan mesin tekan, di mana benda uji diletakkan secara sentris pada bidang tekan mesin. Pembebanan kemudian diberikan secara bertahap hingga beton mengalami keruntuan, sehingga dapat diperoleh nilai kuat tekannya (Rajiman, 2020). Kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.3.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (2.3)$$

Dengan

f'_c = Mutu beton (MPa)

P = Gaya maksimum dari alat uji tekan (N)

A = Luas bagian sampel yang dibebani (mm^2)

2.10.7 Daya Serap Air Maksimal dan Densitas

Pengujian penyerapan air pada bata beton dilakukan menggunakan 3 benda uji untuk mengevaluasi kemampuan material dalam menyerap air yang dapat memengaruhi ketahanan terhadap kondisi lingkungan. Pengujian ini mengacu pada ASTM C140. Perhitungan persentase penyerapan air dapat dilakukan menggunakan Persamaan 2.4

$$\text{Water Absorption}(\%) = \frac{(W_s - W_d)}{W_d} \times 100 \quad (2.4)$$

Setelah melakukan perhitungan penyerapan air, maka dapat dilanjutkan dengan perhitungan densitas menggunakan persamaan 2.5.

$$\text{Densitas} = \frac{W_d}{W_s - W_i} \times 1000 \quad (2.5)$$

Dengan.

W_s = berat jenuh spesimen, (kg),

W_i = berat terendam spesimen, (kg),

W_d = berat kering oven spesimen, (kg).

2.10.8 TCLP

Pengujian TCLP adalah prosedur yang diterapkan untuk penentuan mobilitas bahan pencemar baik senyawa organik dan anorganik yang terdapat dalam cairan, padatan, atau limbah campuran (multifasa) (SNI 8808:2019). Pengujian ini merupakan pengujian yang digunakan untuk menilai kelayakan terhadap lingkungan. Evaluasi hasil pengujian karakteristik limbah dengan membandingkan konsentrasi zat pencemar dari TCLP terhadap baku mutu TCLP A, TCLP B, dan/atau TCLP C, sehingga dapat diketahui kesesuaiannya dengan baku mutu yang ditetapkan (Triana dkk., 2021). Hasil pengujian TCLP yang mengacu pada SNI 8808-2019 dihitung menggunakan Persamaan 2.6.

$$\text{Persen Padatan}(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_{cu}} \quad (2.6)$$

Dengan.

W_0 = Berat awal media penyaring (g)

W_1 = Berat akhir media penyaring (g)

W_{cu} = Berat contoh uji (g)

2.11 Uji Statistik (MANOVA)

Statistika atau statistik merupakan cabang ilmu yang memiliki peran sangat penting dalam berbagai macam aspek kehidupan karena berkaitan dengan pengumpulan, pengolahan, analisis, dan penarikan kesimpulan dari data. Awalnya penerapan statistika lebih banyak digunakan dalam urusan pemerintah atau kenegaraan, namun seiring perkembangan penggunaannya meluas ke berbagai bidang seperti pertanian, bisnis, kimia, komunikasi, ekonomi, pendidikan, serta rekayasa (Wahyuning, 2021). Analisis multivarian merupakan salah satu metode statistik yang digunakan untuk menganalisis data yang melibatkan lebih dari satu variabel, baik berupa beberapa variabel bebas maupun beberapa variabel tak bebas

(Wijaya dan Budiman, 2016). Untuk menerapkan analisis ANOVA, terdapat beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, antara lain.

- a. Variabel dependen minimal dua atau lebih dengan skala interval atau rasio.
- b. Satu variabel independen berskala nominal dengan dua atau lebih kelompok.
- c. Data dependen berasal dari random sampling vektor populasi normal multivarian dengan matriks *variance-covariance* homogen antar kelompok.
- d. Untuk menggunakan prosedur GLM, gunakan prosedur Explore untuk memeriksa data sebelum melakukan analisis variance..

2.12 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini untuk menilai pengaruh dari penggunaan metode maupun bahan yang digunakan terhadap kuat tekan dan daya serap air pada bata beton. Penelitian terdahulu disajikan pada Tabel 2.9.

Tabel 2. 9 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti dan Tahun	Judul Penelitian	Pengaplikasian	Jenis Limbah	Variasi Susbtitusi	Bahan Tambahan	Hasil
1	Zhao dkk., 2023	<i>Effect of Glass Fiber-Reinforced Plastic Waste on the Mechanical Properties of Concrete and Evaluation of Its Feasibility for Reuse in Concrete Applications</i>	Beton	<i>Fly ash</i> (substitusi semen) dan limbah FRP (<i>powder</i>) (substitusi agregat halus)	Fly ash (3%); Limbah FRP (0%, 1%, 3%, dan 5%) (1:2)	<i>superplasticizer (polycarboxylate)</i> 1,5% dari berat semen	Hasil pengujian kuat tekan mencapai 42.72 MPa pada komposisi 1% limbah FRP dan hasil uji kuat tarik optimum mencapai 3,98 MPa pada komposisi 3% limbah FRP.
2	Antika dkk., 2023	Pemanfaatan limbah ongkok aren dan ampas tebu sebagai inovasi batako ramah lingkungan	Bata beton	Abu ampas tebu (AT) (substitusi semen) dan serat ongkok aren (SA) (substitusi agregat)	Variasi AT : 0%, 2.5%, 5%, 7,5%, 10%; Variasi SA : 1% (1:6)	-	Kuat tekan 5,4 - 23,65 MPa dengan variasi terbaik yaitu 7,5% AT dan 1% SA yang telah memenuhi SNI 03-0349-1989 dan nilai penyerapan air sebesar 4,5%.
3	Asokan dkk., 2010	<i>Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete</i>	Beton	Limbah FRP	5% dan 15% (1:1,74:2,91)	<i>superplasticizer (polycarboxylate)</i> 2% dari berat semen	Komposisi 5% menghasilkan uji kuat tekan 70.25 N/mm ² dan hasil uji kuat tarik belah optimum yaitu komposisi 15% dengan nilai uji 4.22 N/mm ² .
4	Nastain dan Yanuar, 2023	KARAKTERISTIK BATAKO SELF COMPACTING CONCRETE (SCC) LIMBAH BAN BEKAS UNTUK MATERIAL DINDING BANGUNAN RAMAH LINGKUNGAN	Bata beton	Ban bekas (0,4 x 0,4 x 2,0 cm)	50%, 55%, 60%, 65%, 70% dan 75% terhadap volume agregat (1:6)	<i>superplasticizer (jenis Visco-10)</i> sebesar 0,5% dari berat semen	Berat batako mengalami penurunan 52,9%, sedangkan pengujian kuat tekan, kuat lentur, dan kuat geser mengalami penurunan seiring bertambahnya konsentrasi limbah ban bekas.
5	Mohammed, 2017	<i>Flexural behavior and analysis of reinforced</i>	Beton	PET	5%, 10%, and 15% dari volume	-	Pada konsentrasi 5% mengalami sedikit penurunan, namun pada

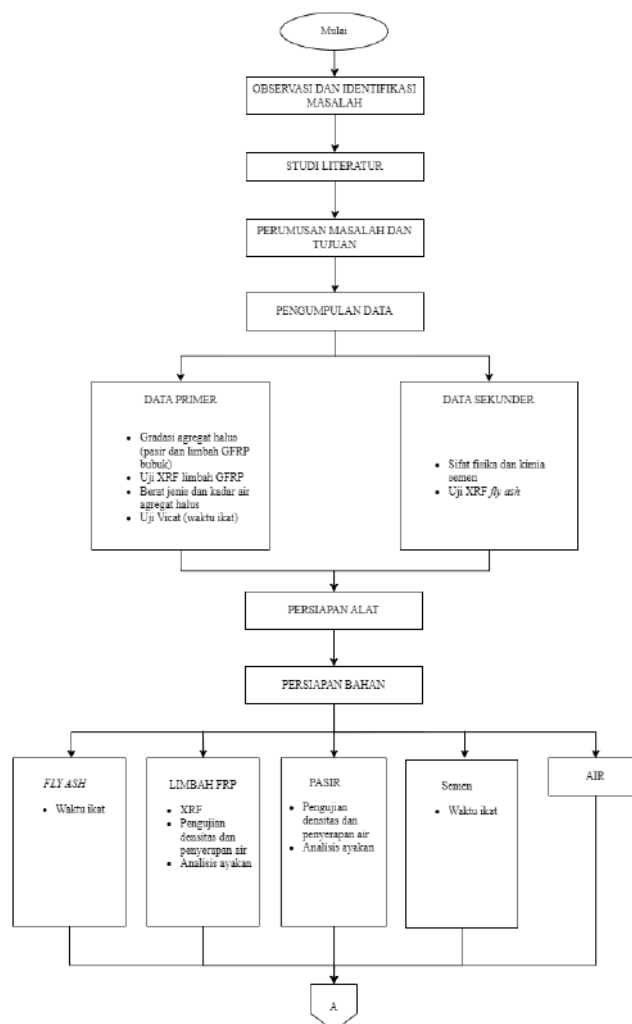
No.	Peneliti dan Tahun	Judul Penelitian	Pengaplikasian	Jenis Limbah	Variasi Susbtitusi	Bahan Tambahan	Hasil
		<i>concrete beams made of recycled PET waste concrete</i>			(1:1.25:2.5)		konsentrasi 10% hingga 15% mengalami peningkatan kuat tekan yang mendekati nilai beton kontrol
6	Islam dkk., 2024	<i>Mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete with raw fly ash as a partial replacement of cement</i>	Beton	<i>Fly ash</i> (substitusi semen)	0%, 10%, 15%, 20%, 25% dari berat semen (1 : 1,5 : 3)	-	Komposisi terbaik adalah pada substitusi 10% <i>fly ash</i> dengan peningkatan nilai kuat tekan 7,9% (apabila dibandingkan dengan sampel kontrol), nilai kuat tarik belah terdapat peningkatan 14,2% (hasil kuat tarik belah sampel kontrol 1.62 MPa), dan hasil kuat lentur terbaik pada komposisi 25% <i>fly ash</i> dengan nilai peningkatan 21,2%.
7	Wibowo & Saidani, 2023	<i>Mortar with fly ash as a partial cement replacement: analysing the compressive strength and heat of hydration</i>	Beton	<i>Fly ash</i> (substitusi semen)	10%, 30%, 50% dari berat semen (1:3)	-	Nilai kuat tekan optimum dicapai pada konsentrasi 10% dengan nilai 23.02 MPa; 30% FA dengan nilai 19.73 MPa; dan 50% FA dengan nilai 19.25 MPa
8	Karim dkk., 2025	<i>Optimizing the Use of Fly ash as Partial Replacement of Fine Aggregate and Cement in Portland Cement Concrete Mixes</i>	Beton	<i>Fly ash</i> tipe c dan tipe f (substitusi semen)	0%, 10%, 20%, 30%, 40%	-	Pada tipe C komposisi dengan nilai kuat tekan tertinggi berada pada rentang 10-30% (apabila dibandingkan dengan beton kontrol), sedangkan pada tipe F komposisi dengan nilai kuat tekan terbaik berada pada rentang 10-20% (apabila dibandingkan dengan beton kontrol),.

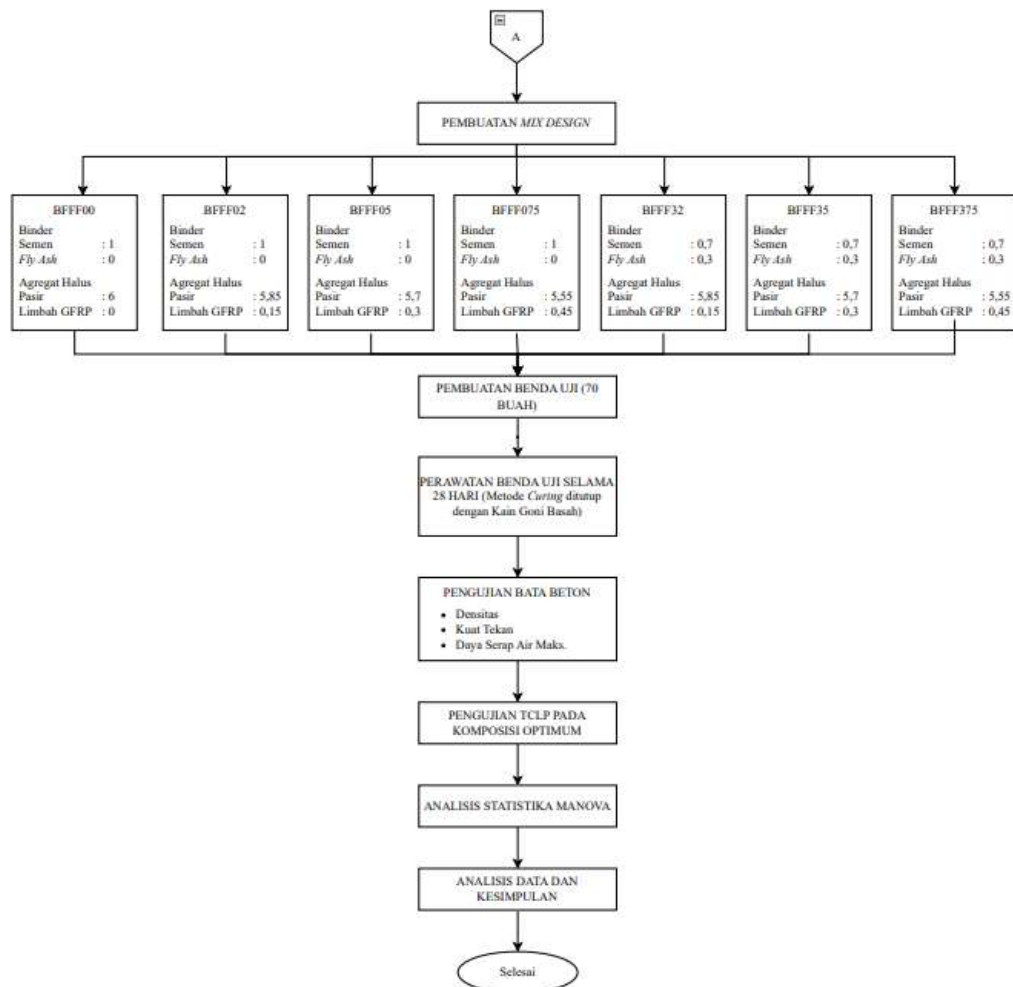
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian merupakan prosedur atau tahapan dalam suatu penelitian secara sistematis, mulai dari awal hingga akhir. Diagram ini dapat mempermudah dalam memvisualisasikan urutan kegiatan, mulai dari perencanaan, pengumpulan dan pengolahan data, analisis, hingga penarikan kesimpulan. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Metode Penelitian

Metode penelitian merupakan suatu prosedur ilmiah yang digunakan untuk menghimpun data secara sistematis sesuai dengan tujuan dan manfaat yang ingin dicapai (Amruddin dkk., 2022). Penelitian merupakan proses investigasi sistematis terhadap hipotesis sebagai jawaban sementara terhadap suatu permasalahan (Hardani dkk., 2020). Metode ini bersifat ilmiah karena telah memenuhi kaidah-kaidah ilmu pengetahuan, yaitu konkrit-empiris, objektif, terukur, rasional, dan sistematis (Sugiyono, 2013). Penelitian kuantitatif berfokus pada pengolahan data berbentuk angka yang dianalisis melalui teknik statistik yang tepat (Hardani dkk., 2020). Penelitian ini akan menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pengujian terkontrol atau sebuah eksperimen untuk mengetahui pengaruh variasi persentase

massa limbah FRP sebagai agregat halus pada bata beton terhadap kuat tekan yang mengacu pada ASTM C-55.

3.3 Tahap Identifikasi Masalah

Masalah penelitian didefinisikan sebagai kesenjangan antara kondisi yang diharapkan (ideal atau seharusnya) dengan realitas yang ada saat ini (Hardani dkk., 2020). Penelitian ini memanfaatkan limbah FRP sebagai bahan substitusi agregat halus serta untuk menemukan variasi yang optimum pada bata beton berlubang. Limbah yang akan digunakan berasal dari Bengkel Kayu PPNS.

3.4 Tahap Perumusan Masalah dan Penetapan Tujuan

Tahap ini merupakan pengembangan dari identifikasi masalah, dimana rumusan masalah diformulasikan sebagai dasar penelitian sekaligus menetapkan tujuan agar penelitian memiliki arah dan sasaran yang tepat. Dengan demikian, tujuan penelitian dapat selaras dengan yang diharapkan. Permasalahan utama pada penelitian ini meliputi akumulasi limbah FRP yang berasal dari industri galangan kapal yang berpotensi dapat merusak lingkungan. Penelitian ini memanfaatkan limbah GFRP sebagai agregat halus pengganti pasir dalam campuran bata beton (batako).

3.5 Studi Literatur

Menurut Hardani dkk. (2020), studi literatur merupakan pembahasan atau materi bacaan yang relevan dengan topik atau temuan dalam suatu penelitian. Dalam penelitian kuantitatif, studi literatur merupakan kumpulan gagasan saling mendukung hipotesis. Studi literatur bermanfaat sebagai solusi dengan menyajikan referensi literatur yang memperjelas kerangka berpikir. Hal ini memungkinkan penemuan solusi atas berbagai permasalahan berdasarkan analisis literatur yang relevan. Studi literatur yang digunakan peneliti, yaitu referensi yang berhubungan dengan penggunaan kembali limbah GFRP sebagai bahan pembuatan bata beton yang terdapat pada buku, jurnal, ataupun artikel ilmiah yang didapatkan melalui perpustakaan ataupun sumber lain yang dapat dipertanggung jawabkan. Referensi tersebut berisi tentang informasi yang dapat digunakan sebagai bahan penunjang pada topik penelitian ini.

3.6 Observasi Lapangan

Observasi lapangan bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi aktual di lokasi sumber limbah. Pengamatan ini akan dilakukan dengan mengumpulkan limbah GFRP di Bengkel Kayu PPNS.

3.7 Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui sumber primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari pengujian material limbah GFRP melalui XRF untuk menganalisis komposisi kimia. Pengujian densitas, kuat tekan, dan daya serap air dilakukan pada 70 benda uji, serta pengujian TCLP dilakukan pada variasi optimum. Sedangkan data sekunder meliputi data jumlah kapal di Indonesia pada Tahun 2024, jumlah timbulan limbah FRP, serta karakteristik fisik dan kimia semen.

3.8 Lokasi dan Waktu Penelitian

3.8.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di beberapa lokasi, diantaranya.

- a. Laboratorium Beton Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) sebagai lokasi pengujian massa jenis material, pengujian daya serap air material, dan pembuatan sampel uji.
- b. Laboratorium Limbah PPNS sebagai tempat pengujian densitas dan daya serap air maksimal.
- c. Pengujian kuat tekan dilakukan di Material Dan Struktur Gedung Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

3.8.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini akan berlangsung selama 6 (enam) bulan, yaitu pada Bulan Januari hingga Juli Tahun 2026.

3.9 Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan 70 sampel bata beton (batako) berlubang yang memanfaatkan limbah GFRP sebagai substitusi agregat halus dan *fly ash* sebagai

substitusi semen dengan dimensi 30 cm x 15 cm x 10 cm (SNI 03-0349-1989). Variasi yang digunakan adalah variasi massa limbah GFRP 0%, 2,5%, 5%, dan 7,5% dari berat pasir yang diadopsi dari penelitian Zhao dkk., 2023. Komposisi *fly ash* 30% dari berat semen yang diadopsi dari penelitian Wibowo & Saidani, 2023. Setiap variasi memiliki 5 buah benda uji (kuat tekan, densitas, dan daya serap air maksimal) dan 1 buah benda uji optimum (TCLP). Semen yang akan digunakan merupakan semen PCC Semen Gresik yang diproduksi oleh PT Semen Gresik dengan nilai FAS (Faktor Air Semen) sebesar 0,45. Penambahan *superplasticizer* (*plycarboxylater ether*) dengan konsentrasi 0,5% dari volume semen untuk meningkatkan *workablity* bata beton yang diadopsi dari penelitian Yan dkk., 2023. Detail perbandingan komposisi agregat dan binder disajikan pada Tabel 3.2 dan jumlah sampel uji yang dibutuhkan untuk masing-masing pengujian disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 1 Perbandingan Komposisi Bata Beton

Kode Benda Uji	Perbandingan Komposisi				Perbandingan	Umur
	Semen	<i>Fly Ash</i>	Pasir	Limbah FRP		
BFF00	1	0	6	0	1:6	28
BFF02	1	0	5,85	0,15		
BFF05	1	0	5,7	0,3		
BFF075	1	0	5,55	0,45		
BFF32	0,7	0,3	5,85	0,15		
BFF35	0,7	0,3	5,7	0,3		
BFF375	0,7	0,3	5,55	0,45		

Tabel 3. 2 Jumlah Benda Uji Berdasarkan Jenis Pengujian

Kode Benda Uji	Jumlah Benda Uji Berdasarkan Pengujian		Jumlah Benda Uji (Buah)
	Penyerapan Air dan Densitas	Kuat Tekan	
BFF00	5	5	10
BFF02	5	5	10
BFF05	5	5	10
BFF075	5	5	10
BFF32	5	5	10
BFF35	5	5	10
BFF375	5	5	10
Total Benda Uji			70
Jenis Pengujian			Jumlah Benda Uji

Kode Benda Uji	Jumlah Benda Uji Berdasarkan Pengujian		Jumlah Benda Uji (Buah)
	Penyerapan Air dan Densitas	Kuat Tekan	
<i>Toxicity Characteristic Leaching Process (TCLP)</i>			1 (variasi 7,5% Limbah GFRP dan 30% FA)

3.9.1 Variabel Bebas

Variabel bebas yang akan digunakan pada penelitian ini adalah variasi massa limbah GFRP sebagai substitusi agregat halus pada bata beton dan variasi massa *fly ash* sebagai substitusi semen.

3.9.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variable yang dipengaruhi oleh adanya variable bebas. Variabel terikat pada penelitian ini yaitu kuat tekan dan daya serap air maksimum (SNI 03-0348-1989), densitas (ASTM C-55), dan TCLP (PP 22/2021).

3.9.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah bata beton yang dikendalikan atau dijaga konstan sehingga tidak memengaruhi variabel bebas. Dalam penelitian ini variabel kontrol yang digunakan adalah semen PCC merek Semen Gresik, benda uji dengan ukuran 30 cm x 15 cm x 10 cm, waktu perawatan beton dilakukan selama 28 hari menggunakan karung goni yang telah dibasahi.

3.10 Definisi Operasional Penelitian

Variabel penelitian akan digunakan sebagai acuan dalam definisi operasional. Definisi operasional pada penelitian ini disajikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 3 Definisi Operasional Penelitian

No.	Variable	Definisi Operasional	Satuan	Alat Ukur/Metode	Skala
1.	Variasi komposisi sampel	Limbah FRP	gram	Neraca	Nominal
		<i>Fly Ash</i>	gram	Neraca	Nominal
		Semen	gram	Neraca	Nominal
		Pasir	gram	Neraca	Nominal

No.	Variable	Definisi Operasional	Satuan	Alat Ukur/Metode	Skala
2.	Kualitas Bata Beton	Kuat Tekan	MPa	<i>Universal Testing Machine</i>	Nominal
		Densitas	Kg/m ³	Perhitungan	Nominal
		Daya Serap Air Maksimal	%	Perhitungan	Nominal
3.	Kelayakan Lingkungan	TCLP (<i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i>)	mg/L	SNI 8808-2019	Nominal

3.11 Pelaksanaan Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa prosedur yang harus dilakukan, yaitu sebagai berikut.

3.11.1 Persiapan Alat dan Bahan

Persiapan alat dan bahan yang akan digunakan pada penelitian pembuatan bata beton berlubang dengan semen, limbah GFRP, *fly ash*, dan pasir.

a. Persiapan Alat

Alat-alat yang diperlukan dalam penelitian ini antara lain:

1. 1 Set cetakan batako 30 cm x 15 cm x 10 cm.
2. Timbangan digital merk *Digital kitchen scale*.
3. *Hand mixer* merk Krisbow.
4. 1 Set saringan
5. Timba atau ember
6. Alat uji tekan
7. Karung goni
8. Oli bekas
9. Sekop atau *shovel*

b. Persiapan Bahan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini meliputi:

1. Semen *portland composite cement* (PCC) merk Semen Gresik
2. Limbah GFRP dari Bengkel Kayu PPNS yang telah digiling halus
3. *Fly ash* berasal dari PLTU Paiton
4. Pasir Lumajang
5. Air PDAM

3.11.2 Pengujian Karakteristik Material

a. Uji Karakteristik Limbah

Pemeriksaan material meliputi pengujian XRF pada *fly ash* untuk mengetahui komposisi kimia limbah GFRP serta *fly ash* dan pengujian gradasi pada agregat halus (pasir dan limbah GFRP) menggunakan metode analisis ayakan yang mengacu pada ASTM C-33.

b. Analisis Ayakan

Analisis ayakan berdasarkan ASTM C-33 dilakukan dengan prosedur berikut.

- 1) Timbang pasir sebanyak 1000 gram.
- 2) Masukkan ke dalam susuan saringan 4,67 mm; 2,38 mm; 1,19 mm; 0,59 mm; 0,297 mm; 0,149 mm; pan.
- 3) Diayak selama ± 10 menit dengan mesin.
- 4) Masing masing pasir yang tertinggal pada saringan ditimbangan dan dicatat. Jumlah berat dihitung kembali.

c. Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus (SNI 1970:2008)

- 1) Menyuci benda uji untuk menghilangkan debu atau bahan-bahan lain yang melekat pada permukaan;
- 2) Mengeringkan benda uji dalam oven pada suhu $(110^{\circ} \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap; sebagai catatan, bila penyerapan dan harga berat jenis digunakan dalam pekerjaan beton dimana agregatnya digunakan pada keadaan kadar air aslinya, maka tidak perlu dilakukan pengeringan dengan oven;
- 3) Mendinginkan benda uji pada suhu kamar selama 1-3 jam, kemudian timbang dengan ketelitian 0,5 gram (Bk);
- 4) Merendam benda uji dalam air pada suhu kamar selama 24 ± 4 jam;
- 5) Mengeluarkan benda uji dari air, lap dengan kain penyerap sampai selaput air pada permukaan hilang, untuk butiran yang besar pengeringan halus satu persatu;
- 6) Menimbang benda uji kering-permukaan jenuh (Bj);

- 7) Meletakkan benda uji didalam keranjang, guncangan batunya untuk mengeluarkan udara yang tersekap dan tentukan beratnya di dalam air (Ba), dan ukur suhu air untuk penyesuaian perhitungan kepada suhu standar (25°C);
 - 8) Mengulangi beberapa kali dan menghitung menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2.
- d. Waktu Ikat Semen (SNI 03-6827-2002)
- 1) Menyiapkan volume air suling yang diperlukan untuk mencapai konsistensi normal sesuai dengan cara yang berlaku;
 - 2) Menuangkan air suling itu kedalam mangkok pengaduk, kemudian masukkan pula secara perlahan-lahan 300 gram benda uji semen ke dalam mangkok pengaduk yang sama; selanjutnya biarkan selama 30 detik;
 - 3) Mengaduk campuran air suling dan benda uji itu selama 30 detik dengan kecepatan pengadukan 140 5 putaran per menit;
 - 4) Pengadukan dihentikan selama 15 detik, membersihkan pasta semen yang menempel dipinggir mangkok pengaduk;
 - 5) Mengaduk kembali pasta semen selama 60 detik dengan kecepatan pengadukan 285 10 putaran per menit;
 - 6) Membuat pasta semen berbentuk bola dengan tangan, sambil dilemparkan sebanyak 6 kali dari tangan kiri ke tangan kanan dengan jarak kedua tangan 15 cm;
 - 7) peganglah cetakan benda uji dengan salah satu tangan, kemudian melalul lobang dasarnya masukkan pasta semen sampai terisi penuh, dan ratakan kelebihan pasta pada dasar cincin dengan sekali gerakan telapak tangan; letakan dasar cincin pada pelat kaca, ratakan permukaan atas pasta dengan sekali gerakan sendok perata dalam posisi miring & haluskan permukaan pasta dengan ujung sendok perata, tanpa mengadakan tekanan pada pasta;

- 8) Meletakkan termometer beton di atas benda uji, lalu simpan di dalam lemari lembab selama 30 menit; selama percobaan benda uji berada dalam cincin & ditahan pelat kaca;
- 9) Mencatat suhu udara dengan termometer laboratorium dan suhu benda uji dengan termometer beton;
- 10) Meletakkan benda uji pada alat vicat, sentuhkan ujung jarum vicat pada tengah-tengah permukaan benda uji dan kencangkan posisi jarum vicat, letakan pembacaan skala pada nol atau catat angka permulaan, dan segera lepaskan jarum vicat;
 - a) catatlah besarnya penetrasi jarum vicat ke dalam benda uji setelah 30 detik;
 - b) Mengulangi pekerjaan (1), setiap 15 menit untuk titik-titik lain yang berbeda pada permukaan benda uji. Jarak titik-titik pengujian adalah 6,5 mm dan letaknya minimum 9,5 mm dari tepi cetakan benda uji;
 - c) setiap kali percobaan penetrasi akan dilakukan, jarum vi-cat harus dibersihkan;
 - d) Selama percobaan penetrasi dilakukan, jarum vicat selalu dalam kondisi lurus dan bebas dari getaran.

3.11.3 Mix Design

Tahapan *mix design* dilakukan guna menentukan kebutuhan material yang diperlukan dari pembuatan bata beton, metode pembuatan dilakukan secara manual. Komposisi campuran untuk membuat 70 benda uji dapat mengacu pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 *Mix Design* Bata Beton

Kode Benda Uji	Variasi Limbah FRP	Perbandingan Komposisi (%)				Perbandingan	Umur
		Binder		Agregat			
		Semen	Fly Ash	Pasir	Limbah FRP		
BFF00	0%	14,29	0,00	85,71	0,00	1:6	28
BFF02	2,5%	14,29	0,00	83,57	2,14		
BFF05	5%	14,29	0,00	81,42	4,29		
BFF075	7,5%	14,29	0,00	79,28	6,43		

Kode Benda Uji	Variasi Limbah FRP	Perbandingan Komposisi (%)				Perbandingan	Umur
		Binder		Agregat			
		Semen	<i>Fly Ash</i>	Pasir	Limbah FRP		
BFF32	2,5%	10	4,29	83,57	2,14	1:6	28
BFF35	5%	10	4,29	81,42	4,29		
BFF375	7,5%	10	4,29	79,28	6,43		

Keterangan :

BFF00	= Batako dengan komposisi 0% FA dan 0% GFRP
BFF02	= Batako dengan komposisi 0% FA dan 2,5% GFRP
BFF05	= Batako dengan komposisi 0% FA dan 5% GFRP
BFF075	= Batako dengan komposisi 0% FA dan 7,5% GFRP
BFF32	= Batako dengan komposisi 30% FA dan 2,5% GFRP
BFF35	= Batako dengan komposisi 30% FA dan 5% GFRP
BFF0375	= Batako dengan komposisi 30% FA dan 7,5% GFRP

3.11.4 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Pada sub-bab ini menjelaskan langkah pembuatan benda uji bata beton berlubang. Benda uji yang akan dibuat yaitu benda uji dengan perbandingan bahan yang disajikan pada Tabel 3.2. Berikut merupakan langkah kerja dalam pembuatan bata beton.

1. Mempersiapkan bahan sesuai dengan perhitungan komposisi *mix design*.
Alat yang dipersiapkan meliputi cetakan dan peralatan lainnya yang diperlukan.
2. Mencampur semua bahan penyusun pengisi bata beton berlubang, yaitu semen *Portland*, *fly ash*, agregat halus pasir, dan limbah FRP bubuk hingga homogen.
3. Menambahkan air ke dalam campuran bahan yang telah dihomogenkan sesuai faktor air semen (FAS) yang ditentukan yaitu 0,45.
4. Melakukan pengadukan pada campuran bahan secara menyeluruh agar air tercampur merata dengan semen *Portland*, *fly ash*, agregat halus pasir, dan limbah GFRP bubuk.
5. Pengadukan dilakukan satu kali untuk setiap variasi komposisi *mix design* bata beton berlubang.
6. Memasukkan adonan yang telah tercampur rata ke dalam cetakan yang telah diolesi minyak pelumas.

7. Mengisi cetakan hingga penuh tanpa ruang kosong dengan permukaan rata.
8. Melakukan pemadatan adonan dengan menekan menggunakan alat pemadat.
9. Mengeluarkan adonan yang telah dipadatkan dari cetakan dan memindahkannya ke tempat perawatan.
10. Menempatkan bata beton berlubang di lokasi teduh dari sinar matahari langsung, lalu melakukan perawatan dengan menutupi karung goni basah selama 28 hari.
11. Mengulangi langkah-langkah yang sama untuk setiap variasi komposisi *mix design*.

3.11.5 Pengujian Benda Uji

Prosedur pengujian bata beton ini mengacu pada ASTM C140 kemudian hasil pengujian diklasifikasikan berdasarkan ASTM C-55 untuk menentukan klasifikasi densitas, maka perlu dilakukan pengujian kuat tekan, daya serap air maksimum, serta pengujian TCLP pada komposisi terbaik mengacu pada SNI 8808- 2019 yang selanjutnya dibandingkan dengan nilai Baku Mutu PP Nomor 22 Tahun 2021. Berikut merupakan langkah kerja dari masing-masing pengujian.

a. Pengujian Kuat Tekan

- 1) Meletakkan spesimen uji sehingga *centroid* permukaan bearing sejajar secara vertikal dengan pusat *thrust bearing block* baja berbentuk *spherical* pada mesin uji tekan.
- 2) Menguji semua *hollow concrete masonry units* dengan *cores* dalam posisi vertikal, kecuali unit khusus yang dirancang untuk *cores* horizontal.
- 3) Menguji *unit masonry solid* 100% dan *hollow units* khusus dengan *cores horizontal* sesuai orientasi penggunaan di lapangan.
- 4) Memastikan plat atas bergerak bebas dalam *spherical seat*-nya sebelum pengujian setiap unit untuk *uniform seating*.
- 5) Memastikan spesimen bebas dari *visible moisture* atau *dampness* saat pengujian.

- 6) Terapkan beban awal hingga $\frac{1}{2}$ *expected maximum load* dengan rate bebas, kemudian atur *uniform rate* sehingga sisa beban diterapkan dalam 1-2 menit.
 - 7) Menyimpan sementara hasil spesimen pertama jika loading time untuk setengah beban kedua >30 detik; sesuaikan rate untuk spesimen berikutnya berdasarkan hasil pertama.
 - 8) Mencatat hasil *maximum compressive load* sebagai $P_{\max}$ dalam satuan pounds (Newtons).
- b. Pengujian Daya Serap Air dan Densitas
- 1) Rendam spesimen uji dalam air bersih pada suhu $15-27^{\circ}\text{C}$ selama 24-28 jam, sehingga permukaan atas spesimen berada minimal 150 mm di bawah permukaan air.
 - 2) Memisahkan spesimen satu sama lain dan dari dasar tangki rendaman dengan spacer minimal 3 mm (seperti kawat anyam atau grating), di mana spacer tidak menutupi lebih dari 10% luas permukaan spesimen yang bersentuhan langsung dengannya.
 - 3) Menimbang spesimen saat digantung dengan kawat logam dan sepenuhnya terendam dalam air, catat berat terendam (w_i).
 - 4) Mengangkat spesimen dari air, ditiriskan dengan meletakkannya di atas kawat anyam ≥ 10 mm, hapus air permukaan yang terlihat menggunakan kain lembab sebelum ditimbang.
 - 5) Menimbang spesimen 60 ± 5 detik setelah diangkat dari air, catat berat jenuh (w_s).
 - 6) Setelah perendaman, Mengeringkan semua spesimen di oven berventilasi pada suhu $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ minimal 24 jam, hingga dua penimbangan berturut-turut (interval 2 jam) menunjukkan penurunan berat $<0,2\%$ dari berat sebelumnya.
 - 7) Mencatat berat kering oven (w_d) setelah mencapai kondisi konstan.
 - 8) Menghitung daya serap air menggunakan persamaan 2.4.
 - 9) Menghitung densitas menggunakan persamaan 2.5.
- c. Pengawetan Sampel Pengujian TCLP (US EPA :1311)

- 1) Pengumpulan bahwa sampel mewakili karakteristik limbah yang akan diuji minimal 500 gram.
- 2) Sampel tidak diperbolehkan diberi bahan pengawet kimia sebelum proses ekstraksi dilakukan agar karakteristik asli sampel tetap terjaga.
- 3) Sampel disimpan pada suhu rendah ($\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) selama penyimpanan apabila pendinginan tidak menyebabkan perubahan fisik yang bersifat permanen pada sampel.
- 4) Setelah proses ekstraksi selesai, ekstrak TCLP harus segera dipersiapkan untuk analisis agar perubahan karakteristik sampel dapat diminimalkan.
- 5) Ekstrak yang akan dianalisis untuk parameter logam diawetkan dengan menambahkan asam nitrat hingga mencapai pH kurang dari 2 ($\text{pH} < 2$), kecuali apabila penambahan asam menyebabkan terbentuknya endapan. Jika endapan terbentuk, ekstrak tidak diasamkan dan harus segera dianalisis.
- 6) Ekstrak yang akan dianalisis untuk parameter selain logam diawetkan sesuai dengan ketentuan metode analisis masing-masing. Untuk analisis senyawa organik, ekstrak harus disimpan tanpa adanya ruang udara (headspace) di dalam wadah guna mencegah hilangnya senyawa yang mudah menguap.
- 7) Seluruh ekstrak yang telah diawetkan disimpan pada suhu $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga waktu analisis sesuai dengan batas waktu penyimpanan (holding time) yang ditetapkan dalam metode TCLP.

d. Pengujian TCLP (SNI 8808:2019)

- 1) Menimbang media penyaring penyaring (W_0);
- 2) Menempatkan media penyaring pada filter holder;
- 3) Merangkaikan perangkat penyaringan
- 4) Menghomogenkan contoh uji;
- 5) Menimbang contoh uji minimal 100 g dan catat beratnya catat beratnya (W_{CU});

- 6) Mendiamkan contoh uji hingga padatan hingga padatan mengendap, untuk contoh u mengendap, untuk contoh uji volatil tidak boleh diendapkan tetapi langsung disaring
- 7) Menyaring contoh uji secara kuantitatif menggunakan sistem penyaring vakum/sistem penyaring bertekanan positif secara bertahap dengan tekanan 1 psi – 10 psi hingga didapatkan filtrat dan padatan;
- 8) Menimbang media penyaring berisi padatan (W1);
- 9) Menentukan persen padatan dari contoh uji menggunakan persamaan 2.6.
- 10) Membandingkan hasil pengujian dengan Baku Mutu pada PP Nomor 22 Tahun 2021.

3.12 Analisis Kelayakan Lingkungan

Pengujian TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) merupakan metode yang digunakan untuk mengukur potensi pelindian dari limbah padat. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kandungan logam berat pada material. Pengujian TCLP dilakukan pada bata beton dengan variasi 7,5% limbah GFRP dan 30% FA dengan mengacu pada Baku Mutu Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021.

3.13 Analisis Data

Setelah melakukan serangkaian pengujian laboratorium, tahap analisis data dilakukan untuk mengolah hasil pengujian secara sistematis. Analisis ini menggunakan dua pendekatan utama, yaitu pendekatan kuantitatif dan statistik. Pendekatan kuantitatif menerapkan MANOVA (*Multivariate Analysis of Variance*) guna membandingkan kemampuan kuat tekan dan daya serap air pada berbagai variasi campuran limbah GFRP sebagai agregat halus dan *fly ash* sebagai substitusi semen. Sementara itu, analisis statistik bertujuan untuk menguji pengaruh interaksi antar variabel menggunakan *software SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)*.

3.13.1 Uji Normalitas

Uji normalitas bertujuan untuk menentukan apakah distribusi data yang digunakan bersifat normal atau tidak. Uji ini dilakukan menggunakan *Software* SPSS dengan kriteria data yang akan dianggap normal jika nilai signifikansi (Sig.) melebihi nilai signifikansi 0,05 (Purnomo dan Sutadji, 2022).

3.13.2 Uji Homogenitas

Uji homogenitas bertujuan untuk menentukan apakah varian antar kelompok data bersifat sama atau berbeda. Kelompok data dikatakan homogen apabila variannya setara. Data dianggap homogen apabila nilai signifikansi (Sig.) pada tabel *Test of Homogeneity of Variances* melebihi nilai signifikansi 0,05. Dasar pengambilan keputusan dalam pengujian homogenitas yaitu: (Purnomo dan Sutadji, 2022)

- a. Jika skor nilai Sig. hitung $\geq 0,05$ maka varian dikatakan homogen atau sama atau sejenis.
- b. Jika skor nilai Sig. hitung $< 0,05$ maka varian dikatakan tidak homogen atau tidak sama atau tidak sejenis.

3.13.3 Uji Hipotesa

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan, diperoleh dugaan sementara terkait pengaruh substitusi limbah FRP dan *fly ash* terhadap karakteristik bata beton. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk membuktikan kebenaran hipotesis yang dirumuskan. Hipotesis penelitian adalah sebagai berikut.

H_0 : Substitusi limbah GFRP dan *fly ash* tidak berpengaruh terhadap kuat tekan, densitas, dan daya serap air pada bata beton.

H_1 : Substitusi limbah GFRP dan *fly ash* berpengaruh terhadap kuat tekan, densitas, dan daya serap air pada bata beton.

3.14 Kesimpulan dan Saran

Tahap ini merupakan merupakan tahap akhir penelitian, dimana seluruh hasil pengujian dianalisis dan disusun menjadi kesimpulan berdasarkan rumusan

masalah. Hasil penelitian ini nantinya dapat dijadikan dasar dalam pemberian saran untuk penelitian berikutnya.

Halaman sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menganalisis pengaruh substitusi limbah GFRP sebagai agregat halus pada bata beton. Metode perawatan dilakukan selama 28 hari menggunakan karung goni basah. Kualitas bata beton dinilai dari hasil pengujian kuat tekan, densitas, penyerapan air, dan kelayakan lingkungan melalui pengujian TCLP pada *mix design* dengan substitusi 7,5% limbah GFRP dan 30% *fly ash*.

4.1 Hasil Karakterisasi Fisik Material

Pengujian karakteristik fisik material bertujuan untuk menganalisis sifat-sifat dan kualitas agregat atau material yang akan digunakan dalam pembuatan produk, sehingga dapat memengaruhi kualitas akhir bata beton (batako).

4.1.1 Hasil Karakterisasi Semen

Pengujian karakteristik semen dilakukan dengan pemeriksaan visual semen, yaitu semen dalam keadaan tidak menggumpal serta butirannya halus. Semen yang digunakan adalah semen PCC (*Portland Composite Cement*) merek Semen Gresik yang selanjutnya dilakukan pengujian densitas semen yang mengacu pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Densitas Semen PCC

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	100	100	100	100,000
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	60,825	60,825	60,825	60,830
Berat Labu + Kerosin (Penuh) (gram)	139,225	139,161	140,261	139,550
Berat Labu + Semen (gram)	110,796	110,346	110,033	110,390
Berat Labu + Semen + Kerosin (gram)	175,970	175,9	175,97	175,950
Massa Semen (gram)	49,97	49,52	49,21	49,57
Massa Kerosin (Kapasitas Penuh) (gram)	78,40	78,34	79,44	78,72

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Kerapatan Kerosin (g/ml)	0,78	0,78	0,79	0,79
Massa Kerosin Sisa (Bersama Semen)	65,17	65,55	65,94	65,56
Volume Kerosin Sisa (ml)	83,13	83,68	83,01	83,27
Volume Semen Aktual (ml)	16,87	16,32	16,99	16,73
Kerapatan (Densitas) Semen (g/cm ³)	2,96	3,03	2,90	2,96

Berdasarkan Tabel 4.1 densitas semen PCC rata-rata adalah 2,96 g/cm³. Hasil tersebut sejalan dengan hasil pengujian yang telah dilakukan oleh Irawan (2017), berat jenis semen PCC dipasaran berkisar antara 2,9–3,09 g/cm³.

4.1.2 Hasil Karakterisasi *Fly Ash*

Fly ash yang digunakan berasal dari PLTU Paiton dan didatangkan pada tanggal 29 Januari 2026 pada pukul 10.00 WIB (Waktu Indonesia Barat). Pengukuran densitas *fly ash* dilakukan menggunakan metode yang sama pada pengukuran densitas semen dengan mengacu pada SNI 2531:2015. Hasil pengujian densitas disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Densitas *Fly Ash*

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	100	100	100	100,000
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	60,666	60,666	60,666	60,666
Berat Labu + Kerosin (Penuh) (gram)	139,161	139,161	139,161	139,161
Berat Labu + <i>Fly ash</i> (gram)	130,666	130,666	130,326	130,553
Berat Labu + <i>Fly ash</i> + Kerosin (gram)	185,572	185,716	185,225	185,504
Massa <i>Fly ash</i> (gram)	70,00	70,00	69,66	69,89
Massa Kerosin (Kapasitas Penuh) (gram)	78,50	78,50	78,50	78,50
Kerapatan Kerosin (g/ml)	0,78	0,78	0,78	0,78

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Massa Kerosin Sisa (Bersama <i>Fly Ash</i>)	54,91	55,05	54,90	54,95
Volume Kerosin Sisa (ml)	69,95	70,13	69,94	70,01
Volume <i>Fly ash</i> Aktual (ml)	30,05	29,87	30,06	29,99
Kerapatan (Densitas) <i>Fly ash</i> (g/ cm ³)	2,33	2,34	2,32	2,33

Pada Tabel 4.2 hasil pengujian densitas *fly ash* yang mengacu pada metode SNI 2531:2015 adalah 2,33 g/cm³. Pengujian densitas dilakukan menggunakan labu ukur dan kerosin yang selanjutnya dilakukan penimbangan untuk mengetahui massa alat dan material. Menurut Aulia dan Mahyudin (2024), penambahan *fly ash* pada campuran beton cenderung menurunkan densitas beton karena densitas *fly ash* lebih rendah dibandingkan semen PCC. Namun, peningkatan proporsi *fly ash* juga meningkatkan kerentanan terhadap penyusutan serta menurunkan *workability* pada beton, sehingga dapat menyebabkan berkurangnya ikatan antar agregat akibat pengurangan jumlah semen.

4.1.3 Hasil Pengujian Waktu Ikat

Pada penelitian ini metode pengujian waktu ikat awal dan waktu ikat akhir mengacu pada SNI 03-6827-2002 yang dilakukan pada pasta 100% semen dan pada pasta campuran (70% semen dan 30% *fly ash*) dengan nilai FAS 0,3 dan 0,35. Hasil pengujian waktu ikat awal dan waktu ikat akhir disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Waktu Ikat

Binder	Faktor Air Semen	Waktu Ikat (menit)		Waktu Ikat (menit) (SNI 03-6827-2002)	
		Awal	Akhir	Awal	Akhir
100% Semen	0,3	87	130	Min. 45	Maks. 375
	0,35	85	120		
70% Semen, 30% <i>Fly Ash</i>	0,3	232	267		
	0,35	165	250		

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.3 waktu ikat awal dan waktu ikat akhir binder telah memenuhi SNI 15-7064-2004. Dimana waktu ikat awal adalah minimal 45 menit dan waktu ikat akhir adalah 375 menit. Menurut Nafiah dkk. (2025), waktu ikat dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan. Semakin tinggi tingkat kelembaban maka waktu ikat yang dibutuhkan akan semakin lama dan sebaliknya apabila tingkat kelembapan rendah maka semakin sedikit waktu yang dibutuhkan. Terdapat perbedaan waktu ikat antara pasta dengan 100% semen PCC dan pasta dengan substitusi 30% *fly ash*, pada pasta dengan 100% memerlukan waktu ikat yang lebih cepat daripada pasta dengan substitusi 30% *fly ash*. Menurut Rahayu dkk (2025), salah satu faktor yang menyebabkan perbedaan waktu ikat adalah ukuran partikel. Partikel yang lebih halus mempercepat hidrasi karena memiliki luas permukaan lebih besar untuk berinteraksi dengan air dan senyawa semen. Sedangkan partikel yang lebih kasar akan memperlambat waktu ikat.

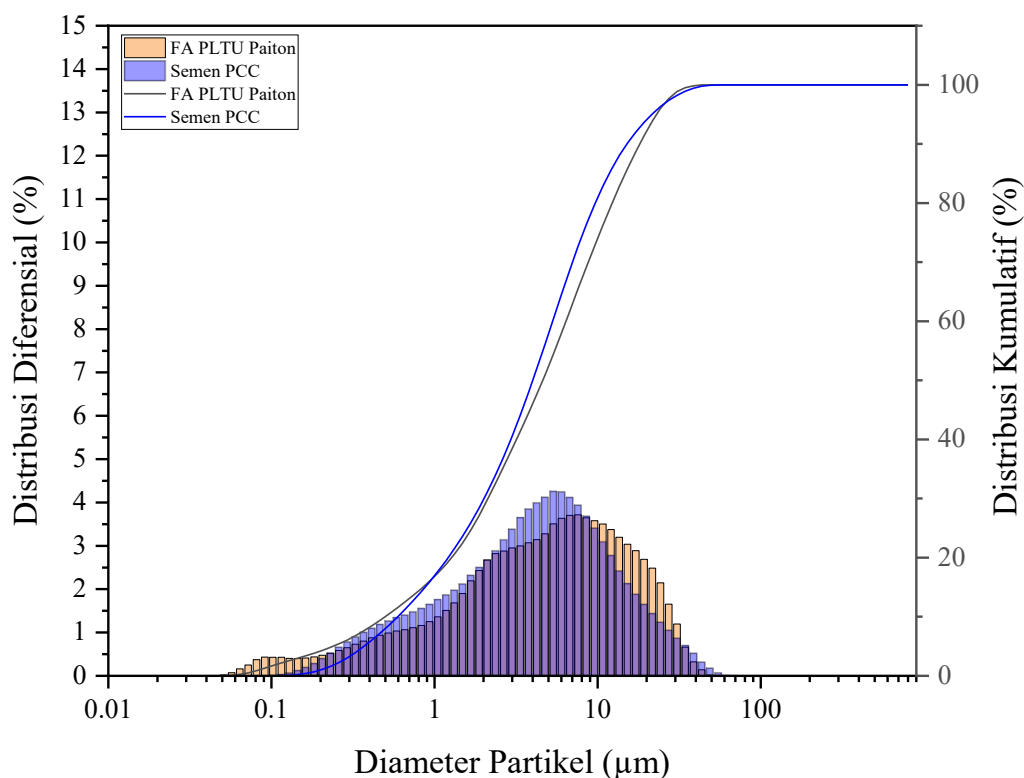
4.1.4 Hasil Uji Ukuran Partikel

Pengujian ukuran partikel menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) yang dilakukan pada sampel semen PCC dan *fly ash*. *Particle Size Analyzer* (PSA) merupakan alat yang memanfaatkan prinsip hamburan cahaya dinamis dalam mengukur distribusi ukuran partikel yang mengalami gerak Brown (Aprilia dkk., 2023). Pengujian PSA dilakukan sebanyak 2 kali pada masing-masing sampel di Laboratorium Terpadu Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Brawijaya.

Berdasarkan hasil pengujian *particle size analysis* (PSA) pada semen PCC dan *fly ash* asal PLTU Paiton, diperoleh bahwa semen PCC memiliki ukuran partikel yang lebih halus dibandingkan *fly ash*. Hal ini ditunjukkan oleh nilai median partikel semen PCC sebesar 3,985–3,996 μm , sedangkan *fly ash* memiliki nilai median yang lebih besar, yaitu 4,608 μm . Nilai mean partikel semen PCC juga lebih rendah, yakni 3,460–3,465 μm , dibandingkan *fly ash* sebesar 3,645–3,666 μm . Sementara itu, nilai modulus ukuran partikel semen PCC sebesar 5,348 μm lebih kecil daripada *fly ash* yang mencapai 6,75 μm .

Selain itu, nilai standar deviasi pada semen PCC yaitu 0,522–0,523 lebih rendah dibandingkan *fly ash* sebesar 0,593–0,597. Hal ini menunjukkan bahwa sebaran ukuran partikel semen PCC lebih homogen atau lebih seragam.

Sebaliknya, *fly ash* memiliki sebaran ukuran partikel yang lebih lebar, yang mengindikasikan variasi ukuran partikel yang lebih besar. Menurut Herastuti dan Ira (2016), ukuran butir material berpengaruh terhadap massa jenis, porositas, dan kadar air. Semakin kecil ukuran butir, massa jenis semakin tinggi, porositas semakin kecil, dan kadar air semakin besar. Sebaliknya, semakin besar ukuran butir, massa jenis semakin rendah, porositas semakin besar, dan kadar air semakin kecil. Grafik ukuran partikel semen PCC dan *fly ash* disajikan pada Gambar 4.1



Gambar 4. 1 Grafik Distribusi Partikel *Fly ash* PLTU Paiton dan Semen PCC

4.1.5 Hasil Karakterisasi Pasir Lumajang

Analisis karakteristik pasir lumajang dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi aktual dengan kondisi ideal dengan mengacu pada standar yang telah diatur dalam SNI dan ASTM. Berikut merupakan hasil analisis karakteristik Pasir Lumajang.

A. Hasil Pengujian Densitas dan Penyerapan Air (SNI 1970: 2008)

Pengujian densitas dan penyerapan air pada Pasir Lumajang yang digunakan sebagai agregat halus dilakukan sebanyak 3 kali pengujian untuk mendapatkan nilai rata-rata, hasil pengujian pengujian disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Densitas dan Penyerapan Pasir Lumajang

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	100,0	100,0	100,0	100,00
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	147,0	147,0	147,0	147,00
Berat Labu + air (Penuh) (gram)	642,0	642,0	642,0	642,00
Massa pasir kering oven	496,0	489,0	489,0	491,33
Berat Labu + Pasir + Air (gram)	956,0	941,0	954,0	950,33
Massa Pasir SSD (gram)	500,0	500,0	500,0	500,00
Berat jenis curah kering (Sd) (g/cm ³)	2,67	2,43	2,60	2,56
Berat jenis curah jenuh kering permukaan (Ss) (g/cm ³)	2,75	2,63	2,82	2,73
Berat jenis semu (Sa) (g/cm ³)	2,73	2,57	2,76	2,68
Penyerapan air (Sw) (%)	0,81	2,25	2,25	1,76

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.4 berat jenis Pasir Lumajang adalah 2,73 g/cm³ dan dengan persentase penyerapan air sebesar 1,76%. Hasil pengujian berat jenis mendekati hasil penelitian Pertiwi dkk (2011), berat jenis Pasir Lumajang adalah 2,6 g/cm³. Menurut Herastuti dan Ira (2016), semakin besar massa jenis material, maka semakin rapat material tersebut. Sehingga kerapatan yang tinggi akan menghasilkan kuat tekan yang tinggi.

B. Hasil Pengujian Kadar Lumpur (ASTM C-117-23)

Pengujian kadar lumpur pada agregat halus bertujuan untuk mengidentifikasi kadar lumpur yang terkandung pada agregat dengan nilai maksimal kurang dari 5%. Hasil pengujian kadar lumpur pada Pasir Lumajang disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Pasir Lumajang

Parameter	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Berat Kering Oven (gram)	300,871	318,922	305,93	308,57
Berat Kering Oven Setelah Pencucian (gram)	285,819	303,841	293,46	294,37
Total Kadar Lumpur (gram)	15,052	15,081	12,47	14,20
Presentase Kadar Lumpur	5,00%	4,73%	4,08%	4,60%

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, persentase kadar lumpur pada Pasir Lumajang adalah 4,6%. Dengan demikian, pasir dapat digunakan tanpa melakukan pencucian sebelum digunakan. Sesuai pada persyaratan agregat halus pada PBI (1971), agregat halus tidak boleh mengandung lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering) dan apabila kadar lumpur melampaui 5%, maka agregat halus harus dicuci. Menurut Bagaskara dan Munthe (2026), peningkatan kadar lumpur menyebabkan penurunan densitas dan kuat mekanik beton, serta peningkatan daya serap air.

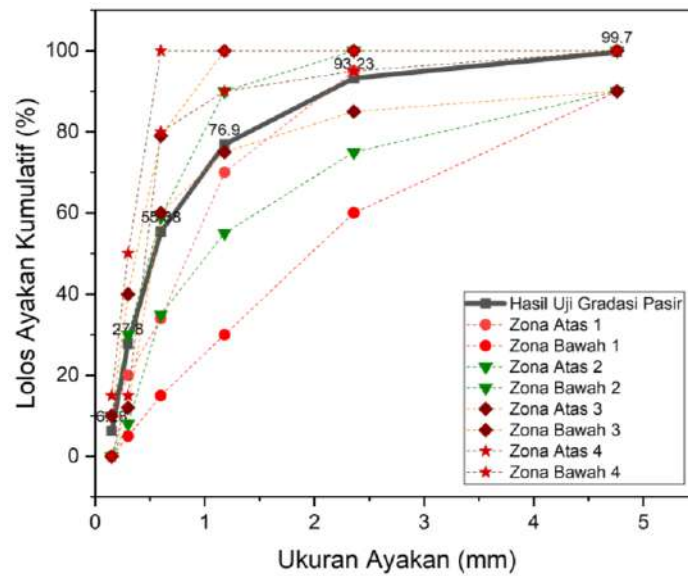
C. Hasil Pengujian Gradasi Agregat Halus (SNI 03-2834-2000)

Pengujian gradasi agregat halus dilakukan menggunakan 1000 g sampel Pasir Lumajang yang diayak menggunakan *sieve shaker* selama 15 menit. Susunan ukuran ayakan mengacu pada SNI 03 -2834-2000 dengan ukuran 4,75 mm hingga 0,15 mm. Hasil pengujian gradasi agregat halus disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Gradasi Pasir Lumajang

Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Berat Lolos (gram)	Jumlah Persentase (%)		
			Tertahan	Lolos	Tertahan Kumulatif
4,75	3,00	997,00	0,30	100,00	0,30
2,30	64,67	932,00	6,47	93,00	6,77
1,18	163,33	769,00	16,33	77,00	23,10
0,60	215,33	554,00	21,53	55,00	44,63
0,30	275,67	278,00	27,57	28,00	72,20
0,15	215,33	63,00	21,53	6,00	93,73
PAN	62,67	0,00	6,27		100,00
Total	1000,00				
Fine Modulus (FM)	2,41				

Berdasarkan Tabel 4.6 *fine modulus* yang dihasilkan adalah 2,41. Menurut ASTM C-33, *fine modulus* pada agregat halus berada pada rentang 2,3 hingga 3,1. Sehingga Pasir Lumajang yang digunakan telah memenuhi kriteria *fine modulus* agregat halus. Untuk mengklasifikasikan zona pada agregat halus, selanjutnya hasil pengujian dibandingkan dengan persentase pada masing – masing zona yang mengacu pada SNI 03 -2834-2000. Gambar 4.1 dapat diklasifikasikan bahwa Pasir Lumajang yang digunakan berada pada zona II menandakan agregat yang digunakan berukuran sedang. Grafik gradasi Pasir Lumajang disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 2 Grafik Gradasi Pasir Lumajang

4.1.6 Hasil Karakterisasi Limbah GFRP

Limbah GFRP merupakan limbah perawatan kapal fiberglass yang ada di Bengkel Kayu PPNS. Agar limbah GFRP dapat digunakan sebagai agregat halus substitusi pasir, limbah ini dicacah terlebih dahulu hingga berbentuk menyerupai serbuk yang lolos ayakan ukuran 4,75 mm. Pengujian karakteristik meliputi pengujian densitas, penyerapan air, dan gradasi agregat halus. Berikut merupakan hasil analisis karakteristik limbah GFRP.

1. Hasil Pengujian Densitas dan Penyerapan Air (SNI 1970: 2008)

Pengujian densitas dan penyerapan air dilakukan menggunakan limbah GFRP yang telah lolos ayakan 4,75 mm. Hasil pengujian densitas dan penyerapan air disajikan pada Tabel 4.7

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Densitas dan Penyerapan Air Limbah GFRP

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	500,0	500,0	500,0	500,00
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	158,0	158,0	158,0	158,00

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Berat Labu + air (Penuh) (gram)	692,0	692,0	692,0	692,00
Massa FRP kering oven	202,0	226,0	217,0	215,00
Berat Labu + FRP + Air (gram)	702,0	707,0	709,0	706,00
Massa FRP SSD (gram)	233,0	233,0	233,0	233,00
Berat jenis curah kering (Sd) (g/cm ³)	0,91	1,04	1,00	0,98
Berat jenis curah jenuh kering permukaan (Ss) (g/cm ³)	1,21	1,10	1,17	1,16
Berat jenis semu (Sa) (g/cm ³)	1,05	1,07	1,09	1,07
Penyerapan air (Sw) (%)	15,35	3,10	7,37	8,37

Pada Tabel 4.7 hasil pengujian berat jenis curah jenuh kering permukaan adalah 1,16 g/cm³ yang setara dengan 1160 kg/m³. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Khalilabad dkk. (2023), berat jenis komposit FRP berada antara 1360 hingga 2002 kg/m³. Berat jenis yang rendah ini dianggap sebagai keuntungan dalam berbagai aplikasi beton. Menurut Agus (2025), perbedaan densitas dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu, metode pencampuran, viskositas, komposisi kimia, dan tekanan.

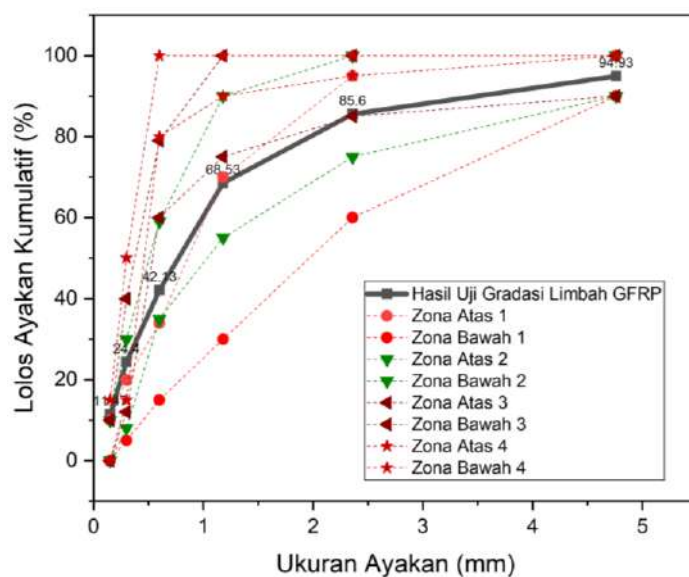
2. Hasil Pengujian Gradasi Agregat Halus (SNI 03-2834-2000)

Pengujian gradasi agregat halus pada limbah GFRP dilakukan menggunakan metode yang sama dengan pengujian gradasi Pasir Lumajang. Namun massa limbah GFRP yang digunakan pada analisis ayakan hanya 300 g. Hasil pengujian gradasi limbah GFRP disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Gradasi Limbah GFRP

Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Berat Lolos (gram)	Jumlah Persentase (%)		
			Tertahan	Lolos	Tertahan Kumulatif
4,75	12,67	237,33	94,93	5,07	5,07
2,30	36,00	214,00	85,60	9,33	14,40
1,18	78,67	171,33	68,53	17,07	31,47
0,60	144,67	105,33	42,13	26,40	57,87
0,30	189,00	61,00	24,40	17,73	75,60
0,15	221,33	28,67	11,47	12,93	88,53
PAN	0,00	0,00	0,00	11,47	100,00
Total	250,00				
Fine Modulus (FM)	2,73				

Berdasarkan ASTM C-33 syarat nilai *fine modulus* agregat halus berkisar 2,3 hingga 3,1. Tabel 4.8 *fine modulus* yang dihasilkan adalah sebesar 2,73. Akibatnya, limbah GFRP yang digunakan telah memenuhi ASTM C-33. Sementara itu, zona gradasi agregat mengacu pada SNI 03 -2834-2000, terdapat 4 zona agregat. Limbah GFRP yang digunakan termasuk dalam zona III yang merupakan zona dengan ukuran butiran agak halus. Menurut Mursyid dkk. (2026), ukuran butir material berpengaruh terhadap kuat tekan beton, di mana material dengan ukuran lebih halus menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Grafik gradasi limbah GFRP disajikan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 3 Grafik Gradasi Limbah GFRP

Berdasarkan penelitian Asokan dkk. (2010), potensi daur ulang limbah GRP untuk meningkatkan kinerja beton. Komposit beton dengan bubuk limbah GFRP secara signifikan dapat meningkatkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kepadatan, serta mengurangi penyusutan dan penyerapan air.

Limbah GFRP dan *fly ash* memiliki potensi untuk dikombinasikan karena sifat hidrofilik GFRP dapat mengikat air berlebih yang tidak bereaksi pada tahap awal hidrasi *fly ash*. *Fly ash* Tipe F yang memiliki reaksi pozolanik lambat dan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk bereaksi dengan Ca(OH)_2 , sehingga air yang tersisa dapat diserap oleh GFRP. Air yang terserap ini kemudian dapat dilepaskan secara perlahan untuk mendukung reaksi pozolanik *fly ash* pada tahap selanjutnya, akibatnya beton yang dihasilkan akan lebih padat dengan porositas dan daya serap air yang lebih rendah.

4.2 Hasil Karakterisasi Kimia Limbah

Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan untuk mengidentifikasi unsur kimia dalam sampel (Sari dkk., 2025). Penelitian ini, uji XRF digunakan untuk mengidentifikasi unsur yang terkandung dalam *fly ash* dan limbah GFRP. Pengujian

karakteristik kimia pada *fly ash* dilakukan oleh internal PLTU Paiton pada tanggal 4 Desember 2026 dan pengujian XRF limbah GFRP dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Malang pada tanggal 10 April 2026.

4.2.1 Hasil Karakterisasi Kimia *Fly ash* PLTU Paiton

Pemeriksaan material dilakukan melalui pengujian XRF untuk menentukan klasifikasi tipe *fly ash* yang akan digunakan. Menurut ASTM C618-22, terdapat tipe *fly ash* yaitu tipe F, dan C. Hasil pengujian XRF *fly ash* disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil Analisis Material *Fly ash* PLTU Paiton

Analisis	Unit	Hasil Uji	ASTM C618	
			Tipe F	Tipe C
LOI	%	0,33	6,0	6,0
SO ₃	%	1,21	5,0	5,0
SiO ₂	%	47,96	-	-
Al ₂ O ₃	%	23,76	-	-
Fe ₂ O ₃	%	8,9	-	-
CaO	%	7,7	<18	>18
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O	%	80,62	>50	>50
<i>Unburned Carbon</i>	%	0,286	-	-
<i>Moisture Content</i>	%	0,02	3,0	3,0
<i>Fines +75 micron</i>	%	6,32	-	-
<i>Fines -75 micron</i>	%	1,65	-	-

Bahan pozolan secara dominan mengandung enam oksida utama, yaitu SiO₂, Al₂O₃, K₂O, CaO, P₂O₅, dan Fe₂O₃, dengan SiO₂ dan Al₂O₃ sebagai komponen paling signifikan yang berperan dalam reaksi pozolanik (Desfitri dkk., 2022). Berdasarkan Tabel 4.2, *fly ash* yang berasal dari PLTU Paiton memiliki kandungan SiO₂ 47,96%, Al₂O₃ 23,76%, Fe₂O₃ 8,9%, dan CaO 7,7% dengan persentase gabungan SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ sebesar 80,62%, *fly ash* ini memenuhi kriteria ASTM C618-22 dengan persentase minimum 50%. Menurut Riyanto (2015), kualitas pozolan ditentukan oleh besarnya kadar gabungan SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ dan tingkat reaktivitasnya dengan kalsium hidroksida (kapur). Sejalan dengan penelitian Zein dkk. (2018), kandungan pozolan pada *fly ash* dapat meningkatkan kuat tekan beton.

Mengacu pada ASTM C618-22, *fly ash* dengan kadar CaO <18% termasuk dalam kategori *fly ash* Tipe F.

4.2.2 Hasil Karakterisasi Kimia Limbah GFRP Bengkel Kayu PPNS

Pengujian karakteristik kimia melalui uji XRF dilakukan untuk mengidentifikasi unsur yang berpotensi meningkatkan mutu bata beton dan unsur yang perlu diperhatikan untuk memenuhi kelayakan lingkungan. Hasil pengujian XRF limbah GFRP disajikan pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian XRF Limbah GFRP

Unsur	Hasil Uji (%)	Jenis Oksida	Hasil Uji (%)
Si	26,3	SiO ₂	38,05
Si	0,89	SO ₃	1,78
Cl	0,9	Cl	0,54
K	1,27	K ₂ O	0,85
Ca	40,65	Al ₂ O ₃	9,81
Al	7,24	MgO	11,37
Mg	11,44	PbO	0,08
Pb	0,15	SrO	0,13
Zn	0,14	Rb ₂ O	0,05
Fe	7,62	ZnO	0,08
Mn	0,17	Fe ₂ O ₃	5,02
Cr	0,13	MnO	0,1
Sc	0,23	Cr ₂ O ₃	0,08
Ti	1,62	V ₂ O ₅	0,04
Lainnya	1,1	TiO ₂	1,27
		Sc ₂ O ₃	0,14
		CaO	30,24
		Lainnya	0,4

Pada Tabel 4.10 limbah GFRP tinggi akan kadar SiO₂ (38,05%), CaO (30,24%), MgO (11,37%), Al₂O₃ 9,81%, dan Fe₂O₃ 5,02%. Dengan persentase gabungan SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ sebesar 52,88%, limbah GFRP memiliki potensi sebagai bahan pozolanik. Pozolan merupakan bahan tambah pada beton, baik yang berasal dari alam maupun limbah industri yang mengandung silika dan alumina. Ketika dicampur dengan air, senyawa-senyawa tersebut akan bereaksi dengan kapur bebas (Karimah dkk., 2023). Sementara itu, MgO merupakan salah satu senyawa dengan kadar yang tinggi. Menurut Du (2005), kuat tekan

maupun kuat tarik beton dengan penambahan MgO lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Peningkatan kekuatan tersebut berkorelasi positif dengan jumlah bubuk MgO yang ditambahkan, suhu pengeringan, dan usia beton.. Namun, menurut Wang dkk. (2022) penambahan dosis MgO yang terlalu tinggi dapat menurunkan kuat tekan pada beton. Disamping itu, limbah GFRP juga mengandung unsur B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) seperti Pb, Zn, dan Cl dimana kandungan tersebut telah diatur dalam Lampiran XI Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian TCLP untuk menilai kelayakan lingkungan pada produk yang akan dihasilkan.

4.3 Pembuatan Bata Beton

Pembuatan bata beton dengan ukuran 30x15x10 cm dilakukan menggunakan metode manual di Laboratorium Beton Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Penelitian ini material yang digunakan adalah semen, *fly ash*, Pasir Lumajang, dan limbah GFRP. Pembuatan bata beton (batako) dalam penelitian ini mengkombinasikan interaksi kimia-fisik antara semen PCC, *fly ash* Tipe F PLTU Paiton, pasir Lumajang Zona II, dan limbah GFRP. Semen PCC dengan ukuran partikel halus dan homogen (median 3,985–3,996 μm) berfungsi pemicu hidrasi awal secara cepat, sementara substitusi *fly ash* mengoptimalkan kekuatan jangka panjang melalui reaksi pozolanik dari kandungan silika dan alumina aktifnya yang tinggi ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 80,62\%$). Pasir Lumajang yang termasuk Zona II memberikan kerangka struktural yang rapat, sedangkan substitusi parsial dengan serbuk limbah GFRP Zona III (berbutir agak halus) mereduksi berat jenis bata beton densitas rendahnya (1,16 g/cm³). Kombinasi utama tercapai melalui sifat hidrofilik GFRP yang menyerap kelebihan air dalam adukan segar dan melepaskannya secara bertahap untuk mendukung kelanjutan reaksi pozolanik *fly ash* yang lambat. Selain itu, potensi pozolanik pada limbah GFRP ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 52,88\%$) serta kadar MgO (11,37%) yang memperkuat ikatan binder terhadap agregat, sehingga menghasilkan bata beton dengan densitas lebih tinggi, porositas lebih rendah, dan daya serap air yang minimal.

Pembuatan bata beton mengacu pada *mix design* Tabel 3.4 menggunakan FAS (Faktor Air Semen) $0,30 \pm 0,05$ serta perbandingan 1:6 (semen : agregat) dengan

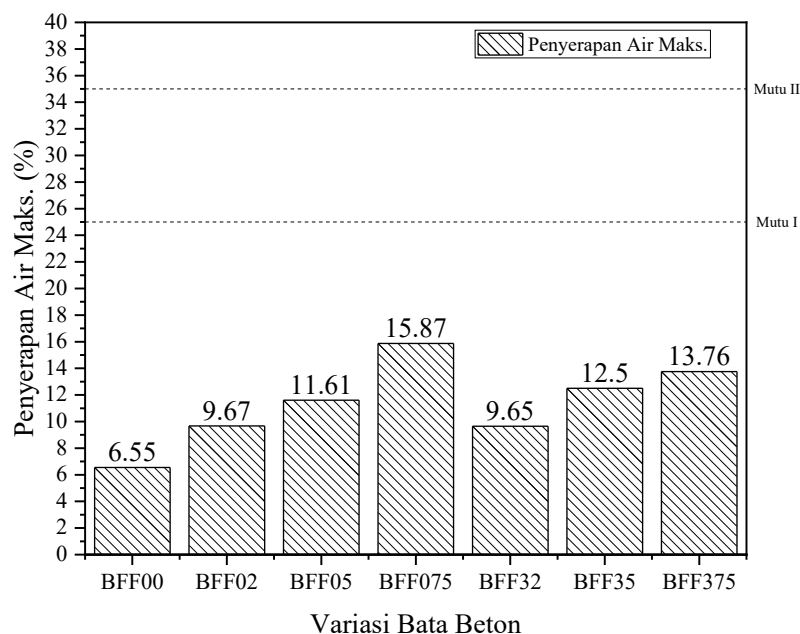
safety factor 15%. Penambahan FAS ± 0.05 dikarenakan suhu lokasi cetak yang dinamis. Detail perhitungan dapat dilihat pada Lampiran D. Menurut Ramadhan dkk. (2025), perbedaan suhu di permukaan beton dipengaruhi suhu lingkungan serta suhu di dalam beton dapat menyebabkan retakan dan mengurangi nilai kuat tekan beton. Menurut Tefnai dkk. (2025), air berperan sangat penting dalam proses pengerjaan campuran beton dan mortar karena air bereaksi dengan semen akan menjadi pasta pengikat agregat. Penambahan air diharapkan dapat menghindari mortar mengeras pada saat proses cetak yang menyebabkan keretakan pada bata beton.

4.4 Hasil Pengujian Fisik dan Mekanik Bata Beton

Setelah melalui serangkaian proses pembuatan bata beton, tahap selanjutnya adalah proses perawatan (*curing*) dilakukan selama 28 hari. Proses *curing* dilakukan dengan menutup bata beton menggunakan karung goni yang telah dibasahi (*moist curing*), untuk menjaga kelembapan dan mendukung perkembangan kekuatan beton secara optimal. Selanjutnya dilakukan pengujian penyerapan air dan densitas, dan kuat tekan pada bata beton.

4.4.1 Hasil Pengujian Penyerapan Air Bata Beton

Metode pengujian penyerapan air pada bata beton dilakukan dengan mengacu pada SNI 03-0348-1989 yang dilaksanakan di Laboratorium Pengolahan Limbah PPNS. Pengujian ini diawali dengan melakukan perendaman 5 benda uji pada masing-masing variasi selama 24–28 jam dengan suhu 15–26,7°C. Selanjutnya dilakukan penimbangan pada kondisi SSD dan pada saat kering oven. Setelah pengujian dilakukan, selanjutnya hasil pengujian densitas digunakan untuk menentukan kelas bata beton berdasarkan densitas dan penyerapan air. Klasifikasi penyerapan air mengacu pada SNI 03-0348-1989. Hasil pengujian penyerapan air disajikan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Penyerapan Air Bata Beton

Berdasarkan hasil pengujian daya serap air yang disajikan pada Gambar 4.4, seluruh variasi bata beton memiliki nilai daya serap air di bawah 25%. Oleh karena itu, semua variasi memenuhi persyaratan Mutu I berdasarkan SNI 03-0348-1989. Nilai daya serap air terendah diperoleh pada variasi kontrol (BFF00) sebesar 6,55%, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada variasi 7,5% limbah GFRP tanpa *fly ash* (BFF075) sebesar 15,87%. Variasi 2,5% limbah GFRP tanpa *fly ash* (BFF02), Variasi 5% limbah GFRP tanpa *fly ash* (BFF05), Variasi 2,5% limbah GFRP dengan 30% *fly ash* (BFF32), Variasi 5% limbah GFRP dengan 30% *fly ash* (BFF35), dan Variasi 7,5% limbah GFRP dengan 30% *fly ash* (BFF375) masing-masing memiliki daya serap air sebesar 9,67%, 11,61%, 9,65%, 12,5%, dan 13,76%. Meskipun terjadi peningkatan daya serap air pada beberapa variasi akibat penambahan limbah GFRP dan *fly ash*, seluruh nilai yang diperoleh masih berada jauh di bawah batas maksimum yang ditetapkan standar. Hal ini menunjukkan bahwa bata beton yang dihasilkan masih memiliki tingkat kepadatan yang memenuhi mutu I dan tidak mengalami peningkatan rongga yang berlebihan.

Pada campuran yang menggunakan kombinasi limbah GFRP dan *fly ash* sebesar 30% terhadap berat semen, diperoleh nilai daya serap air sebesar 9,65% pada variasi 2,5% limbah GFRP (BFF32), 12,5% pada variasi 5% limbah GFRP (BFF35), dan 13,76% pada variasi 7,5% limbah GFRP (BFF375). Meskipun menggunakan tambahan *fly ash*, bata beton dengan variasi 2,5% limbah GFRP (BFF32) memiliki daya serap air yang sedikit lebih rendah dibandingkan variasi 2,5% limbah GFRP tanpa *fly ash* (BFF02). Hal ini menunjukkan bahwa pada kadar GFRP yang rendah, *fly ash* dapat berperan sebagai material pengisi (*filler*) yang membantu mengisi rongga-rongga kecil di dalam campuran sehingga struktur bata beton menjadi lebih rapat. Namun, pada variasi BFF35 dan BFF375, peningkatan kadar GFRP menyebabkan efek pengisian tersebut tidak lagi mampu mengimbangi bertambahnya pori akibat penggunaan limbah, sehingga daya serap air kembali meningkat.

Meskipun demikian, seluruh variasi masih memenuhi persyaratan Mutu I SNI 03-0348-1989 dengan nilai daya serap air kurang dari 25%. Hasil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah GFRP dan *fly ash* dalam penelitian ini masih dapat menghasilkan bata beton dengan ketahanan yang baik terhadap penetrasi air, sehingga berpotensi digunakan sebagai alternatif material bangunan yang memenuhi standar mutu yang berlaku.

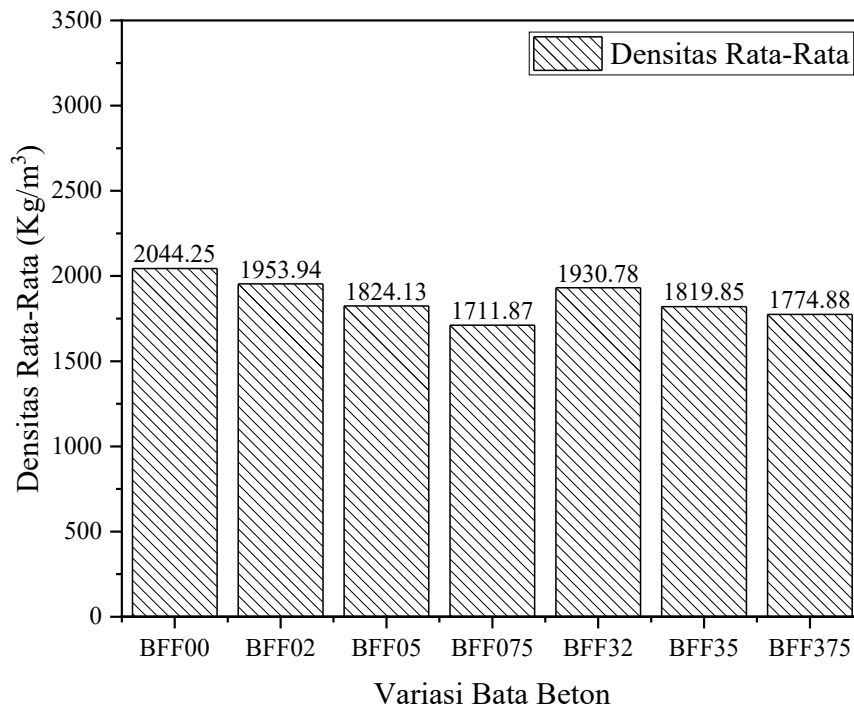
4.4.2 Hasil Pengujian Densitas Bata Beton

Metode pengujian penyerapan air pada bata beton dilakukan dengan mengacu pada ASTM C140 yang dilaksanakan di Laboratorium Pengolahan Limbah PPNS. Pengujian ini diawali dengan melakukan perendaman 5 benda uji pada masing-masing variasi selama 24–28 jam dengan suhu 15–26,7°C. Selanjutnya dilakukan penimbangan pada kondisi SSD, berat di dalam air, dan pada saat kering oven. Setelah pengujian dilakukan, hasil pengujian densitas digunakan untuk menentukan kelas bata beton berdasarkan densitas bata beton. Klasifikasi densitas mengacu pada ASTM C55.

Hasil pengujian densitas bata beton menunjukkan bahwa nilai densitas berkisar antara 1.711,87 kg/m³ hingga 2.044,25 kg/m³. Densitas tertinggi diperoleh pada variasi kontrol (BFF00) sebesar 2.044,25 kg/m³, sedangkan

densitas terendah diperoleh pada variasi 7,5% limbah GFRP tanpa FA (BFF075) sebesar 1.711,87 kg/m³. Berdasarkan klasifikasi ASTM C55, variasi kontrol termasuk dalam kategori normal weight karena memiliki densitas lebih dari 2000 kg/m³, sedangkan seluruh variasi dengan substitusi limbah GFRP termasuk dalam kategori medium weight karena berada pada rentang 1680 kg/m³ - 2000 kg/m³. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan limbah GFRP sebagai substitusi agregat halus cenderung menghasilkan bata beton dengan berat jenis yang lebih rendah dibandingkan bata beton normal. Meskipun demikian, seluruh variasi masih memiliki kepadatan yang memenuhi ASTM C-55 sehingga berpotensi digunakan sebagai material konstruksi, terutama untuk aplikasi non-struktural maupun struktural ringan.

Berdasarkan Gambar 4.5, terlihat adanya kecenderungan penurunan densitas seiring dengan meningkatnya persentase limbah GFRP yang digunakan. Campuran bata beton tanpa *fly ash*, densitas menurun dari 2.044,25 kg/m³ pada variasi kontrol menjadi 1.953,94 kg/m³ pada variasi 2,5% limbah GFRP tanpa FA (BFF02), 1.824,13 kg/m³ pada variasi 5% limbah GFRP tanpa FA (BFF05), dan 1.711,87 kg/m³ pada variasi 7,5% limbah GFRP tanpa FA (BFF075). Tren yang sama juga terjadi pada campuran dengan penambahan 30% *fly ash*, yaitu dari 1.930,78 kg/m³ pada variasi 2,5% limbah GFRP (BFF32) menjadi 1.819,85 kg/m³ pada variasi 5% limbah GFRP (BFF35) dan 1.774,88 kg/m³ pada variasi 7,5% limbah GFRP (BFF375). Penurunan densitas disebabkan oleh berat jenis limbah GFRP yang lebih rendah dibandingkan pasir serta bentuk partikelnya yang kurang seragam sehingga meningkatkan jumlah rongga pada bata beton.

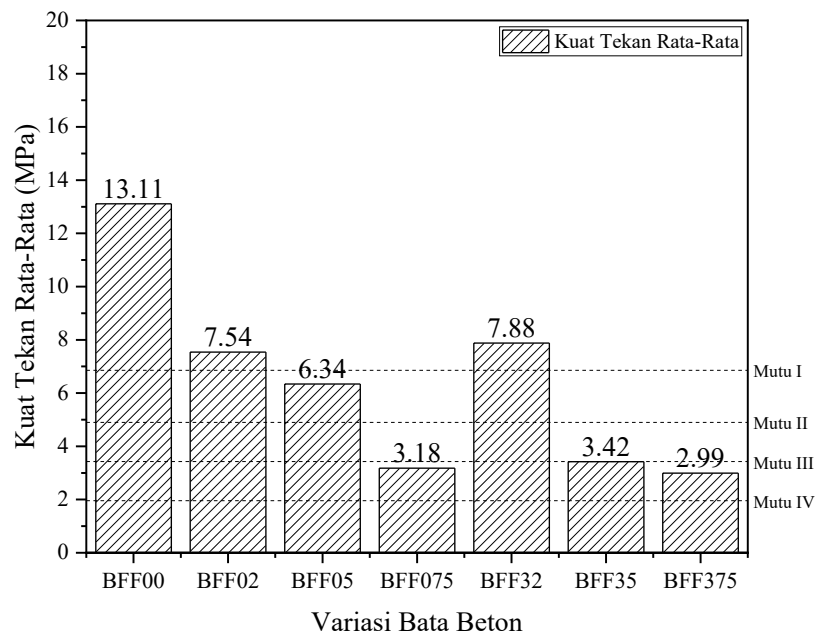


Gambar 4. 5 Densitas Bata Beton

Hasil pengujian densitas juga menunjukkan keterkaitan yang erat dengan hasil pengujian daya serap air yang telah dibahas sebelumnya. Secara umum, bata beton dengan densitas yang lebih tinggi cenderung memiliki daya serap air yang lebih rendah karena jumlah pori dan rongga di dalam material relatif sedikit. Sebaliknya, penurunan densitas umumnya diikuti oleh peningkatan daya serap air akibat bertambahnya volume pori yang dapat diisi oleh air.

4.4.3 Analisis Hasil Pengujian Kuat Tekan Bata Beton

Metode pengujian kuat tekan pada bata beton dilakukan dengan mengacu pada SNI 03-0348-1989 untuk menentukan klasifikasi mutu bata beton setelah melakukan *curing* selama 28 hari. Pengujian dilakukan pada tanggal 26 Mei, 2 Juni, dan 9 Juni 2026 menggunakan UTM (*Universal Testing Machine*) di Laboratorium Beton, Material Maju, dan Komputasi Mekanik FTSPK-ITS. Benda uji yang digunakan pada proses pengujian berjumlah 5 buah benda uji yang dipilih berdasarkan kondisi fisik terbaik pada masing– masing hasil cetak setiap variasi. Hasil pengujian kuat tekan rata-rata dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Grafik Kuat Tekan Bata Beton

Keterangan : (PUBI, 1982; Halaman 27)

- Mutu I : digunakan untuk memikul beban dan dapat digunakan pada konstruksi yang tidak terlindungi dari cuaca.
- Mutu II : digunakan untuk memikul beban tetapi penggunaannya hanya untuk konstruksi yang terlindung dari cuaca luar (di bawah atap).
- Mutu III : digunakan untuk konstruksi sebagaimana pada mutu A1, hanya saja permukaan dinding konstruksi dari bata beton tersebut boleh tidak diplester.
- Mutu IV : digunakan untuk konstruksi yang tidak memikul beban, dinding penyekat, dan lain-lainnya serta konstruksi yang terlindungi dari cuaca luar.

Berdasarkan Gambar 4.5, nilai kuat tekan rata-rata bata beton menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan meningkatnya persentase substitusi limbah GFRP dan penggunaan *fly ash*. Variasi kontrol (BFF00) menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 13,11 MPa yang memenuhi persyaratan Mutu I menurut SNI 03-0348-1989. Variasi yang menggunakan limbah GFRP sebagai substitusi agregat halus tanpa penambahan *fly ash*, nilai kuat tekan menurun dari 7,54 MPa pada variasi 2,5% limbah GFRP (BFF02) menjadi 6,34 MPa pada variasi 5% limbah GFRP (BFF05) dan 3,18 MPa pada variasi 7,5% limbah GFRP (BFF075). Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar persentase limbah GFRP yang digunakan, semakin rendah kuat tekan bata beton yang dihasilkan. Penurunan kuat

tekan terjadi karena karakteristik limbah GFRP yang memiliki bentuk partikel tidak seragam menyebabkan terbentuknya rongga pada bata beton.

Pada campuran yang menggunakan kombinasi limbah GFRP dan *fly ash* sebesar 30% terhadap berat semen, diperoleh kuat tekan sebesar 7,88 MPa pada variasi 2,5% limbah GFRP (BFF32). Nilai tersebut kemudian menurun menjadi 3,42 MPa pada variasi 5% limbah GFRP (BFF35) dan 2,99 MPa pada variasi 2,5% limbah GFRP (BFF375). Meskipun variasi BFF32 masih memenuhi kategori Mutu II, peningkatan kadar GFRP menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan. Selain dipengaruhi oleh keberadaan limbah GFRP, kondisi tersebut juga berkaitan dengan penggunaan *fly ash* sebagai substitusi semen. *Fly ash* merupakan material pozzolan yang bereaksi lebih lambat dibandingkan semen Portland sehingga pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan memerlukan waktu yang lebih lama. Akibatnya, perkembangan kuat tekan pada umur pengujian belum berlangsung secara optimal, terutama pada campuran dengan persentase *fly ash* yang relatif tinggi.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan persentase limbah GFRP cenderung menurunkan kuat tekan bata beton, baik pada campuran tanpa *fly ash* maupun pada campuran yang menggunakan *fly ash*. Berdasarkan klasifikasi SNI 03-0348-1989, variasi kontrol termasuk Mutu I, BFF02, BFF05, dan BFF32 termasuk Mutu II, BFF35 termasuk Mutu III, sedangkan BFF075 dan BFF375 termasuk Mutu IV. Dari seluruh variasi yang menggunakan limbah, campuran BFF32 menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 7,88 MPa, sedangkan pada campuran tanpa *fly ash* nilai tertinggi diperoleh pada BFF02 sebesar 7,54 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan limbah GFRP pada kadar rendah masih berpotensi diterapkan sebagai substitusi agregat halus dalam pembuatan bata beton tanpa menyebabkan penurunan kuat tekan yang terlalu besar. Namun, peningkatan kadar GFRP hingga 7,5% menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan, sehingga penggunaannya perlu dibatasi pada komposisi optimum agar mutu bata beton tetap memenuhi persyaratan yang berlaku.

4.5 Analisis Kelayakan Lingkungan terhadap Limbah GFRP

Analisis kelayakan lingkungan dilakukan melalui pengujian TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Process*). Pengujian TCLP adalah uji pelindian pada senyawa berbahaya, seperti logam berat yang dapat mencemari lingkungan dari suatu sampel (Cahyono dkk., 2024). Hasil pengujian TCLP disajikan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Hasil Uji TCLP

Parameter	Satuan	Hasil	PP. No. 22 Tahun 2021		Metode
			TCLP-A	TCLP-B	
Timbal (Pb)	mg/L	0,0115	3	0,5	SNI 6898-82:2018
Seng (Zn)	mg/L	0,12	300	50	SNI 6898-82:2018
Klor (Cl)	mg/L	31,8	75.000	12.500	SNI 8808.19:2009

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.11 dapat diidentifikasi bahwa kadar timbal sebesar 0,0115 mg/L, seng sebesar 0,12 mg/L, dan klor sebesar 31,8 mg/L telah memenuhi baku mutu pada PP Nomor 22 Tahun 2021. Memanfaatkan limbah sebagai substitusi material bata beton dapat menurunkan kadar pencemar pada limbah yang digunakan, penurunan kadar pencemar pada bata beton disebabkan oleh kemampuan binder dalam mengikat material. Menurut Steliga dkk. (2018), senyawa yang berasal dari reaksi hidrasi semen terutama tersusun atas kalsium silikat hidrat dengan struktur kristal yang tidak teratur atau fase C-S-H, serta kalsium hidroksida. Kedua hasil reaksi hidrasi tersebut memiliki peran penting dalam menentukan kekuatan dan ketahanan material yang dihasilkan. Selain itu, pasta semen yang telah terhidrasi juga menunjukkan kemampuan khusus dalam imobilisasi (menurunkan mobilisasi) limbah beracun, terutama ion-ion logam berat.

4.6 Analisis Statistika

Analisis statistika adalah metode yang digunakan untuk mengetahui apakah ada pengaruh atau tidak ada pengaruh yang signifikan antara variabel independen (substitusi agregat halus dengan limbah GFRP dan substitusi *fly ash* pada binder terhadap variabel dependen (densitas, penyerapan air, dan kuat tekan).

4.6.1 Uji Normalitas

Pada penelitian ini uji normalitas dilakukan berdasarkan metode Uji *Shapiro-Wilk*. Uji *Shapiro-Wilk* adalah salah satu metode uji normalitas yang paling populer, terutama untuk dataset dengan ukuran sampel kecil (biasanya kurang dari 50) (Sianturi, 2025). Hasil pengujian normalitas menggunakan metode *Shapiro-Wilk* melalui *software* SPSS disajikan pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Hasil Uji Normalitas

NO.	Parameter	Variasi	Metode	Hasil sig.	Batas Sig.	Kesimpulan
1	Penyerapan Air	BFF00	<i>Shapiro - Wilk</i>	0,279	>0,05	Memenuhi
2		BFF02		0,505		Memenuhi
3		BFF05		0,804		Memenuhi
4		BFF075		0,719		Memenuhi
5		BFF32		0,859		Memenuhi
6		BFF35		0,947		Memenuhi
7		BFF375		0,545		Memenuhi
8	Densitas	BFF00		0,656		Memenuhi
9		BFF02		0,099		Memenuhi
10		BFF05		0,366		Memenuhi
11		BFF075		0,533		Memenuhi
12		BFF32		0,775		Memenuhi
13		BFF35		0,307		Memenuhi
14		BFF375		0,289		Memenuhi
15	Kuat Tekan	BFF00		0,708		Memenuhi
16		BFF02		0,309		Memenuhi
17		BFF05		0,474		Memenuhi
18		BFF075		0,367		Memenuhi
19		BFF32		0,214		Memenuhi
20		BFF35		0,602		Memenuhi
21		BFF375		0,002		Tidak Memenuhi

Berdasarkan hasil pengujian normalitas menggunakan metode *Shapiro-Wilk*, mayoritas data menghasilkan nilai signifikansi $>0,05$ yang menandakan data telah terdistribusi normal. Namun, terdapat variabel dependen yang menghasilkan nilai signifikansi $<0,05$, yaitu pada variabel dependen kuat tekan variasi BFF375 dengan nilai signifikansi 0,002. Meskipun terdapat data yang dengan nilai signifikansi $<0,05$, hasil uji normalitas dapat diabaikan dan dapat melanjutkan pengujian selanjutnya berdasarkan asumsi *Central Limit Theorem* karena memiliki 35 data. Menurut Ghasemi dan Zahediasl (2012), *Central Limit Theorem* menyatakan bahwa distribusi rata-rata sampel akan berdistribusi normal apabila data sampel berasal dari populasi yang berdistribusi normal.

Selain itu, jika ukuran sampel >30 data maka distribusi rata-rata sampel akan tetap mendekati distribusi normal tanpa bergantung pada bentuk distribusi data asalnya.

4.6.2 Uji Homogenitas

Metode uji homogenitas yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Levene Test*. Uji Levene dibuat untuk menilai homogenitas varians secara lebih tangguh, bahkan saat asumsi normalitas terganggu. Prinsip dasarnya melibatkan perhitungan deviasi absolut setiap data dari pusat kelompok (median atau rata-rata), diikuti dengan pengujian apakah variasi rata-rata deviasi ini berbeda secara signifikan antar kelompok (Fatih dkk., 2026). Hasil pengujian homogenitas menggunakan metode *Levene Test* melalui *software* SPSS disajikan pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Homogenitas

Parameter	Metode	Hasil sig.	Batas Sig.	Kesimpulan
Penyerapan Air	<i>Levene</i>	0,22	>0,05	Memenuhi
Densitas		0,137		Memenuhi
Kuat Tekan		0,134		Memenuhi

Hasil pengujian homogenitas menggunakan metode *Levene Test* menghasilkan nilai signifikansi $>0,05$, yaitu 0,22 pada penyerapan air, 0,137 pada densitas, dan 0,134 pada kuat tekan. Dapat disimpulkan bahwa data tersebut telah homogen dan dapat dilanjutkan dengan pengujian MANOVA karena telah memenuhi prasyarat pengujian MANOVA.

4.6.3 Uji MANOVA

Setelah melakukan pengujian normalitas dan homogenitas didapatkan hasil data yang berdistribusi normal dan varian antar variabel yang homogen dan dilanjutkan pengujian statistika yaitu uji MANOVA. Hasil pengujian manova menggunakan melalui *software* SPSS disajikan pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Hasil Pengujian Manova

Variasi	Hasil sig.	Batas Sig.	Hipotesis	Kesimpulan
Komposisi Limbah GFRP dan <i>Fly Ash</i>	0,000	$<0,05$	H_0 ditolak; H_1 diterima	Berpengaruh

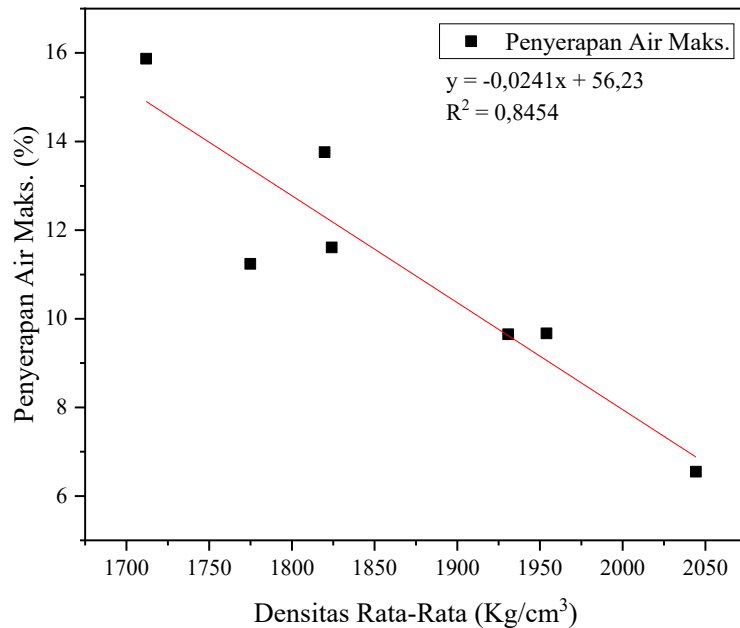
Berdasarkan Tabel 4.14 hasil pengujian MANOVA pada variasi komposisi limbah GFRP dan *fly ash* menghasilkan nilai signifikansi $<0,05$, yaitu 0,000, sehingga H_1 diterima dan H_0 ditolak. Dari hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa terdapat pengaruh variasi komposisi limbah GFRP dan *fly ash* terhadap variabel dependen (penyerapan air, densitas, dan kuat tekan).

4.7 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis statistika yang telah dilakukan, variasi substitusi limbah GFRP dan *fly ash* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik fisik dan mekanik bata beton. Hasil uji MANOVA menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,000 ($<0,05$), yang mengindikasikan bahwa variasi komposisi limbah GFRP dan *fly ash* berpengaruh terhadap densitas, daya serap air, dan kuat tekan bata beton. Peningkatan persentase limbah GFRP menyebabkan penurunan densitas dan kuat tekan, serta peningkatan daya serap air. Kondisi ini berkaitan dengan karakteristik limbah GFRP yang memiliki berat jenis lebih rendah dibandingkan pasir Lumajang, yaitu sebesar $1,16 \text{ g/cm}^3$, sedangkan pasir Lumajang memiliki berat jenis semu sebesar $2,73 \text{ g/cm}^3$. Akibatnya, substitusi pasir dengan limbah GFRP menyebabkan kepadatan campuran berkurang dan meningkatkan jumlah rongga di dalam bata beton.

Pengaruh variasi substitusi limbah GFRP dan *fly ash* terhadap densitas bata beton terlihat dari adanya kecenderungan penurunan densitas seiring meningkatnya persentase limbah GFRP. Densitas tertinggi diperoleh pada variasi kontrol (BFF00) sebesar $2.079,06 \text{ kg/m}^3$, sedangkan densitas terendah diperoleh pada variasi variasi 7,5% limbah GFRP (BFF075) sebesar $1.705,19 \text{ kg/m}^3$. Berdasarkan klasifikasi ASTM C55, variasi kontrol termasuk kategori normal weight, sedangkan seluruh variasi yang menggunakan limbah GFRP termasuk kategori medium weight.

Penurunan densitas ini menunjukkan bahwa limbah GFRP mampu menghasilkan bata beton yang lebih ringan dibandingkan bata beton konvensional. Namun demikian, penurunan densitas juga menunjukkan adanya peningkatan volume rongga di dalam struktur bata beton yang berpotensi memengaruhi sifat mekanik dan ketahanan material terhadap penetrasi air.

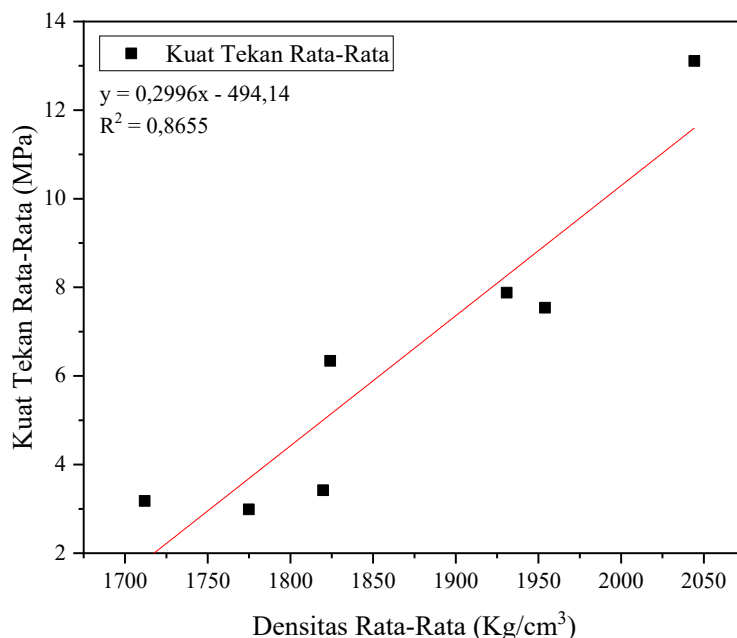


Gambar 4. 7 Hubungan Densitas terhadap Penyerapan Air Bata Beton

Hubungan antara densitas dan daya serap air dapat diamati melalui Grafik 4.7 hubungan densitas terhadap penyerapan air dengan nilai $R^2 = 0,8454$. Grafik tersebut menunjukkan adanya kecenderungan hubungan negatif, yaitu semakin tinggi densitas bata beton maka semakin rendah nilai daya serap air yang dihasilkan. Variasi kontrol yang memiliki densitas tertinggi menghasilkan daya serap air terendah sebesar 6,55%, sedangkan variasi variasi 7,5% limbah GFRP (BFF075) yang memiliki densitas terendah menghasilkan daya serap air tertinggi sebesar 15,87%.

Fenomena ini menunjukkan bahwa densitas merupakan salah satu faktor yang memengaruhi kemampuan material dalam menyerap air. Menurut Jierula dkk. (2024), beton dengan densitas 1200 Kg/cm³ yang diturunkan menjadi 1000 Kg/cm³ akan mengalami peningkatan penyerapan air sebesar 25,49%. Bata beton dengan densitas tinggi memiliki struktur yang lebih rapat sehingga jumlah pori yang dapat diisi oleh air menjadi lebih sedikit. Sebaliknya, bata beton dengan densitas rendah cenderung memiliki porositas yang lebih besar sehingga air lebih mudah masuk dan tersimpan di dalam material. Meskipun terjadi peningkatan daya serap air pada beberapa variasi, seluruh bata beton yang dihasilkan masih memenuhi persyaratan

Mutu I berdasarkan SNI 03-0348-1989 karena memiliki nilai daya serap air kurang dari 25%.



Gambar 4. 8 Hubungan Densitas Terhadap Kuat Tekan Bata Beton

Hubungan yang sama juga terlihat pada Grafik 4.8 hubungan densitas terhadap kuat tekan dengan nilai $R^2 = 0,8655$. Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi densitas bata beton, semakin tinggi pula kuat tekan yang dihasilkan. Variasi kontrol dengan densitas sebesar 2.079,06 kg/m³ menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 13,11 MPa, sedangkan variasi variasi 7,5% limbah GFRP (BFF075) dengan densitas sebesar 1.705,19 kg/m³ hanya menghasilkan kuat tekan sebesar 3,18 MPa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa terdapat batas optimum penggunaan limbah GFRP sebelum material tersebut memberikan pengaruh negatif terhadap sifat mekanis bata beton. Sejalan dengan penelitian Zhao dkk. (2023), penggunaan limbah GFRP dalam jumlah kecil masih dapat mempertahankan kekuatan material, namun peningkatan kadar GFRP yang lebih tinggi cenderung menyebabkan penurunan kuat tekan secara bertahap.

Pada penelitian Bitouri dkk. (2024), nilai kuat tekan dengan konsentasi 3% dari volumen agregat halus menghasilkan nilai kuat tekan yang mendekati nilai kuat tekan variasi kontrol, tetapi mengalami penurunan yang bertahap pada konsentrasi 5%, 10%, dan 15%. Hubungan ini menunjukkan bahwa peningkatan

jumlah rongga akibat substitusi limbah GFRP tidak hanya menurunkan densitas tetapi juga mengurangi kemampuan bata beton dalam menahan beban tekan. Rucka dan Kurpińska (2025), beton dengan nilai densitas tinggi akan menghasilkan rongga yang lebih sedikit dibandingkan dengan beton dengan densitas rendah. Rongga yang terbentuk dapat menjadi titik lemah yang mempermudah terjadinya retakan ketika material menerima beban. Oleh karena itu, densitas dapat digunakan sebagai salah satu indikator kualitas bata beton karena berkaitan erat dengan porositas dan kekuatan mekanik material.

Penggunaan *fly ash* sebesar 30% sebagai substitusi semen menunjukkan pengaruh yang berbeda pada setiap variasi. Variasi 2,5% limbah GFRP (BFF32) diperoleh kuat tekan sebesar 7,88 MPa dengan daya serap air sebesar 9,65%, yang menunjukkan kinerja lebih baik dibandingkan variasi tanpa FA (BFF02) yang hanya menggunakan limbah GFRP. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada kadar limbah GFRP yang rendah, *fly ash* dapat berperan sebagai *filler* yang mengisi rongga-rongga mikro dalam campuran sehingga menghasilkan struktur yang lebih rapat. Berdasarkan hasil pengujian PSA, *fly ash* PLTU Paiton memiliki ukuran partikel 3,645–3,666 μm . Mursyid dkk. (2026), semakin halus ukuran butir material dalam komposisi beton, akibatnya semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan.

Selain itu, kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 pada *fly ash* sebesar 80,62% memungkinkan terjadinya reaksi pozzolanik yang menghasilkan senyawa Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) tambahan. Senyawa tersebut berperan dalam meningkatkan kepadatan matriks dan memperbaiki ikatan antarpartikel dalam bata beton. Menurut Pratiwi dkk. (2020), reaksi hidrasi semen dan reaksi pozzolanik *fly ash* pada bata beton terjadi melalui reaksi berikut.

Reaksi Trikalsium Silikat (C_3S):



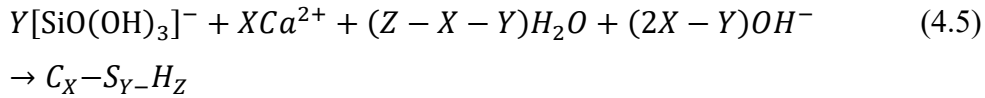
Reaksi Dikalsium Silikat (C_2S):



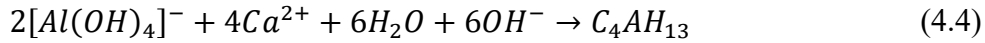
Reaksi awal pozzolan:



Pembentukan C-S-H hasil reaksi pozzolan:



Pembentukan Kalsium Aluminat Hidrat:



Reaksi hidrasi semen diawali dengan hidrasi senyawa trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S) yang menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai produk utama penyusun kekuatan beton serta kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sebagai produk samping. Selanjutnya, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang terbentuk dimanfaatkan dalam reaksi pozzolan dengan material yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), seperti *fly ash*. Saat pasta dalam kondisi basa, ion hidroksida (OH^-) melarutkan ikatan silika dan aluminosilikat sehingga menghasilkan ion silikat dan aluminat yang kemudian bereaksi dengan ion kalsium (Ca^{2+}) membentuk produk hidrasi sekunder berupa kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan kalsium aluminat hidrat (C_4AH_{13}).

Pembentukan produk hidrasi sekunder tersebut mampu memanfaatkan sisa reaksi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dari hasil hidrasi semen, mengisi pori-pori matriks, memperbaiki mikrostruktur pasta semen, serta meningkatkan densitas, kuat tekan, dan durabilitas material berbasis semen. Dengan demikian, keberadaan material pozzolan seperti *fly ash* tidak hanya berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*), tetapi juga berperan aktif melalui reaksi kimia yang menghasilkan senyawa pengikat tambahan sehingga meningkatkan kinerja mekanik dan ketahanan beton.

Namun, pada variasi 5% limbah GFRP (BFF35) dan variasi 7,5% limbah GFRP (BFF375), peningkatan jumlah limbah GFRP menyebabkan efek positif *fly ash* tidak lagi mampu mengimbangi peningkatan porositas yang terjadi sehingga kuat tekan kembali mengalami penurunan. Menurut Rahayu dkk. (2025), reaksi pozzolanik baru terjadi setelah terbentuk kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dari proses hidrasi semen, sehingga pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan membutuhkan waktu yang lebih lama. Akibatnya, perkembangan kuat tekan pada umur awal belum berlangsung secara optimal, terutama ketika persentase substitusi *fly ash* yang digunakan relatif tinggi.

Tabel 4. 15 Hasil Pengujian Bata Beton Berdasarkan Standar Mutu

Variasi	Kuat Tekan (Mpa)	Penyerapan Air (%)	Densitas (Kg/m ³)	Standar Mutu				² Densitas (Kg/m ³)
				¹ Kuat Tekan (Mpa)		¹ Penyerapan Air (%)		
				Min.	Mutu	Maks.	Mutu	
BFF00	13.11	6.55	2044.25	6,86	I	25	I	<i>Normal Weight</i>
BFF02	7.54	9.67	1953.94	6,86	I	25	I	<i>Medium Weight</i>
BFF05	6.34	11.61	1824.13	4,90	II	25	I	<i>Medium Weight</i>
BFF075	3.18	15.87	1711.87	1,96	IV	25	I	<i>Medium Weight</i>
BFF32	7.88	9.65	1930.78	6,86	I	25	I	<i>Medium Weight</i>
BFF35	3.42	12.50	1819.85	3,43	III	25	I	<i>Medium Weight</i>
BFF375	2.99	13.76	1774.88	1,96	IV	25	I	<i>Medium Weight</i>

Keterangan:

¹SNI 03-0348-1989 (Bata Beton untuk Pasangan Dinding)

² ASTM C55 (*Standard Specification for Concrete Building Brick*)

Berdasarkan Tabel 4.15, variasi variasi 2,5% limbah GFRP dengan FA (BFF32) dapat dianggap sebagai komposisi optimum berdasarkan hasil kelayakan teknis. Variasi tersebut menghasilkan kombinasi sifat fisik dan mekanik yang paling seimbang di antara seluruh campuran yang menggunakan limbah. Nilai kuat tekan yang diperoleh masih memenuhi kategori Mutu I berdasarkan SNI 03-0348-1989, sedangkan daya serap air tetap berada pada kategori Mutu I. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi substitusi limbah GFRP sebesar 2,5% terhadap agregat halus dan *fly ash* sebesar 30% terhadap semen masih mampu menghasilkan bata beton yang memiliki performa teknis yang baik sekaligus memanfaatkan limbah sebagai bahan penyusun dan dapat diaplikasikan untuk memikul beban serta dapat digunakan pada konstruksi yang tidak terlindungi dari cuaca. Namun, apabila ditinjau dari pemanfaat limbah juga dapat menggunakan variasi variasi 7,5% limbah GFRP dengan FA (BFF375), karena nilai kuat tekan yang dihasilkan masih memenuhi kategori IV. Bata beton dengan kategori mutu IV dapat diaplikasikan untuk konstruksi yang tidak memikul beban, dinding penyekat, dan lain-lainnya serta konstruksi yang terlindungi dari cuaca luar. Sehingga, apabila bata beton diaplikasikan sebagai struktur ringan di luar ruangan dapat menggunakan variasi

BFF32 dan apabila digunakan untuk pengaplikasian non-struktur sebagai penyekat di dalam ruangan dapat menggunakan variasi BFF375.

Sementara itu, penilaian aspek kelayakan lingkungan dilakukan melalui pengujian Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). Pengujian ini dilakukan karena hasil analisis XRF menunjukkan bahwa limbah GFRP mengandung unsur yang berpotensi tergolong B3, seperti Pb, Zn, dan Cl. Pengujian TCLP dilakukan pada variasi 7,5% limbah GFRP (BFF375) yang merupakan variasi dengan komposisi limbah tertinggi, variasi ini dipilih dengan asumsi apabila pada komposisi 7,5% limbah GFRP memenuhi baku mutu. Maka dari itu, variasi dengan komposisi <7,5% limbah GFRP juga memenuhi baku mutu berdasarkan TCLP-A PP 22/2021.

Berdasarkan Tabel 4.11, bata beton dengan substitusi 7,5% limbah GFRP dan 30% *fly ash* (BFF375) telah memenuhi baku mutu TCLP-A berdasarkan baku mutu PP 22/2021 dengan nilai Pb sebesar 0,0115 mg/L, Zn sebesar 0,12 mg/L, dan Cl sebesar 31,8 mg/L. Sementara itu, nilai baku mutu yang diatur dalam PP 22/2021 yaitu 3 mg/L (Pb), 300 mg/L (Zn), dan 75.000 mg/L (Cl). Dengan demikian, bata beton dengan konsentrasi limbah tertinggi telah memenuhi baku mutu TCLP-A dan dapat dinyatakan telah memenuhi kelayakan lingkungan.

Reaksi binder dalam mengikat material juga berkontribusi dalam menurunkan kandungan pencemar, hal tersebut juga dapat diidentifikasi melalui hasil pengujian penyerpan air yang menghasilkan nilai penyerapan dibawah 25%. Dengan demikian, baik variasi BFF32 maupun pada variasi BFF375 dapat diaplikasikan sebagai material kontruksi yang aman bagi lingkungan.

Pada penelitian ini tidak dilakukan analisis ukuran partikel menggunakan *Particle Size Analyzer* (PSA) dan tidak dilakukan karakterisasi morfologi serta komposisi permukaan menggunakan *Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDX), sehingga data mengenai distribusi ukuran partikel dan bentuk permukaan. Jadi tidak dilakukan analisis pengaruh ukuran dan bentuk partikel terhadap sifat mekanik serta sebaran antara serat kaca dan resin saat limbah dimanfaatkan. Dengan demikian, pada penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan pengujian PSA guna memperoleh distribusi ukuran partikel dan pengujian SEM-EDX untuk mengamati morfologi partikel, sebaran

serat kaca, serta komposisi elemen permukaan. Hasil pengujian tersebut akan melengkapi analisis karakter fisik-kimia limbah GFRP. Penelitian Purwati dkk. (2014), susunan butiran yang heterogen akan saling mengisi rongga yang mengakibatkan peningkatan densitas dan penurunan rongga pada beton, sehingga akan memengaruhi kuat tekan beton.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi limbah GFRP dan *fly ash* memengaruhi densitas, daya serap air, dan kuat tekan bata beton. Berdasarkan grafik hubungan antara densitas dengan penyerapan air menghasilkan nilai koefisien regresi 0,8454 dan pada grafik hubungan densitas dengan kuat tekan menghasilkan nilai koefisien regresi 0,8655 yang menandakan kedua hubungan tersebut memiliki korelasi yang sangat kuat. Menurut Suwarno dalam Santoso dkk. (2021), nilai koefisien korelasi $>0,75-0,99$ merupakan nilai korelasi sangat kuat. Peningkatan kadar limbah GFRP cenderung menurunkan densitas dan kuat tekan serta meningkatkan daya serap air. Namun, penggunaan limbah GFRP dalam jumlah terbatas yang dikombinasikan dengan *fly ash* masih mampu menghasilkan bata beton dengan mutu yang memenuhi standar. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah GFRP dan *fly ash* berpotensi menjadi alternatif material ramah lingkungan yang mendukung konsep ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan pada sektor konstruksi.

Halaman sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Terdapat pengaruh substitusi limbah GFRP dan *fly ash* terhadap penyerapan air, densitas, dan kuat tekan pada bata beton. Variasi dengan hasil optimum yaitu pada variasi 2,5% limbah GFRP serta 30% FA (BFF32) dengan penyerapan air 9,65%, densitas 1910,38 Kg/m³, dan kuat tekan 7,88 MPa dengan mutu I SNI 03-0348-1989. Sementara itu, variasi variasi 7,5% limbah GFRP dengan 30% FA (BFF375) merupakan variasi alternatif pemanfaatan limbah sebagai bata beton dengan penyerapan air 13,76%, densitas 1773,92 Kg/m³, dan kuat tekan 2,99 MPa yang memenuhi mutu IV SNI 03-0348-1989.
2. Pada bata beton dengan konsentrasi limbah tertinggi menghasilkan nilai Pb sebesar 0,0115 mg/L, Zn sebesar 0,12 mg/L, dan Cl sebesar 31,8 mg/L yang memenuhi baku mutu TCLP-A, sehingga bata beton dengan substitusi limbah GFRP telah memenuhi kelayakan lingkungan.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut.

1. Proses pencetakan bata beton dapat dilakukan menggunakan mesin press untuk meningkatkan kepadatan bata beton.
2. Melakukan karakterisasi limbah GFRP menggunakan PSA untuk mengetahui distribusi ukuran partikel serta SEM-EDX untuk mengamati morfologi permukaan dan sebaran serat kaca.
3. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan uji kelayakan ekonomi.

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Administration, F. H. (2003). *Fly Ash Facts for Highway Engineers* (IV). **Federal Highway Administration FHWA-IF-63-019**.
- Agus, J. (2025). Biofoam Dari Serat Kapas Dengan Pengikat Pati Sagu Bermatriks *Polyvinil Alkohol* (PVA). **Jurnal Sains Fisika**, 5(2), 49–62.
<https://doi.org/10.24252/sainfis.v5i2.63996>
- Al-kind, G. Y. (2019). *Evaluation the Solidification / Stabilization of Heavy Metals by Portland Cement*. **Journal of Ecological Engineering**, 20(3), 91–100.
- Al Fatih, F., Lubis Putri, N., Hsb Nisah, K., Zulpan, & Arianto. (2026). Konsep Homogenitas dan Normalitas dalam Statistik serta Teknik Pengujiannya. **Educational Journal**, 1(3), 805–817.
<https://doi.org/doi.org/10.63822/b98bqe88>
- Alfarisyi, M., Dharmawan, A., & Miswar, D. Y. (2022). Optimasi Kebutuhan Udara Pembakaran Batubara untuk Meningkatkan Kinerja Boiler PLTU Tanjung Awar-Awar. **Sntem**, 2 (November).
- Amruddin, A., Priyanda, R., Agustina, T. S., Ariantini, N. S., Rusmayani, N. G. A. L. Aslindar, D. A., Ningsih, K. P., Wulandari, S., Putranto, P., Yuniati, I., Untari, I., Mujiani, S., & Wicaksono, D. (2022). *Metodologi Penelitian Kuantitatif* (F. Sukmawati (ed.); I). CV. Pradina Pustaka Grup.
- Anonim. (1971). *Peraturan Beton Bertulang Indonesia*. Departemen Pekerjaan Umum.
- Anrozi, R., & Trihadiningrum, Y. (2017). Kajian Teknologi dan Mekanisme Stabilisasi/Solidifikasi untuk Pengolahan Limbah B3. **Jurnal Teknik ITS**,

6(2).

Antika, A. R., Asharab, A. H., Setiabudi, B., & Hartonod. (2023). Pemanfaatan Limbah Onggok Aren dan Ampas Tebu Sebagai Inovasi Batako Ramah Lingkungan. **Jurnal Sipil dan Arsitektur ramah lingkungan**, 1(2), 16–22.

Aprilia, A. P., Nugraha, A. R., Aziz, A. N., Amalia, R., Shafa, E., Jelita, L., Husna, M. N., Seftiyani, S. P., & Semarang, U. N. (2023). Kulit Telur Berbasis eco-Composite dan Kaolin sebagai Bahan Pelapis Kertas Superhidrofobik. **Jurnal Analis**, 2(2), 200–208.

Ardhy, S., Putra, M. E., & Islahuddin. (2019). Pembuatan Kapal Nelayan *Fiberglass* Kota Padang dengan Metode *Hand Lay Up* Sanny. **Rang Teknik Journal**, 2(1).

Asokan, P., Osmani, M., & Price, A. D. F. (2010). *Improvement of the Mechanical Properties of Glass Fibre Reinforced Plastic Waste Powder Filled Concrete*. **Construction and Building Materials**, 24(4), 448–460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.017>

ASTM. (2019). *C140/C140M: Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Unit*. <https://doi.org/10.1520/C0140>

ASTM C-33. (2001). *Standard Specification for Concrete Aggregates*.

ASTM C494. (2001). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*.

Aulia, H., & Mahyudin, A. (2024). Pengaruh Persentase Fly ash terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Papan Beton Ringan dengan *Filler* Serat Sabut Pinang. **Jurnal Fisika Unand (JFU)**, 13(4), 452–458.

Aziz, F. N. A. A., A R, T., N B, B., & N A M, N. (2023). Properties of Concrete with Glass Fibre Reinforced Polymer Waste as Partial Replacement of Fine Aggregate Properties of Concrete with Glass Fibre Reinforced Polymer Waste ss Partial Replacement of Fine Aggregate. **Journal of Physics: Conference Series**. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2521/1/012015>

Bagaskara, M. H., & Munthe, A. T. (2026). Pengaruh Variasi Kadar Lumpur Pasir Cimalaka terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Beton dengan Penambahan Superplasticizer FBAS. **Momentum J. Inov. Rekayasa Tek. Sipil**, 2(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.64123/mjirts.v2.i1.2>

Bitouri, Y. El, Fofana, B., Romain, L., & Perrin, D. (2024). *The Effects of Replacing Sand with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Waste on the Mechanical Properties of Cement Mortars*. **Eng**. 277.

Brouwer, P. (2013). *Theory of xrf*. **PANalytical B.V**.

BSN. (1989). SNI 03-0349-1989: Bata beton untuk pasangan dinding.

BSN. (2000). Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal.

BSN. (2002). SNI 03-6827-2002: Metode pengujian waktu ikat awal semen portland dengan menggunakan alat vicat untuk pekerjaan sipil.

BSN. (2004). Semen Portland Komposit.

BSN. (2008). SNI 1970:2008: Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus.

BSN. (2019). SNI 8808:2019: Prosedur Pelindian Leaching Karakteristik Beracun (*Toxicity Characteristic Procedure*) ,.

C-117-23, A. (2023). *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No .*

- 200) *Sieve in Mineral*. 200, 1–2. <https://doi.org/10.1520/C0117-23.1>
- C618-22, A. (n.d.). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use*. <https://doi.org/10.1520/C0618-22.A>
- Cahyono, L., Carina, A., Pratiwi, W. D., Fardina, F., Widiana, D. R., Utomo, A. P., & Fahmi, M. R. (2024). Sustainable Materials melalui Solidifikasi-Stabilisasi Limbah Sandblasting menjadi Beton Fero semen. **Dearsip**, 04(02), 108–118.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials* (III). **Springer is**.
- Desfitri, E. R., Desmiarti, R., Martynis, M., & Dhani, S. R. (2022). Analisis dan Karakterisasi Potensi Pozzolan Sebagai Sumber Silika (SiO_2) Untuk Meningkatkan Nilai Sumber Daya Lokal. **Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan**, 6, 96–105.
- Du, C. (2005). *A Review of Magnesium Oxide in Concrete*. **Concrete International**, December, 45–50.
- EPA. (1992). *TOXICITY CHARACTERISTIC LEACHING PROCEDURE (1311)*
- Farizal, T., Rahman, A., Munawir, A., & Darsan, H. (2023). Effect of Variation of Cement Water Factor in Concrete Mixture with the Addition of Palm Shell on the Pressive Strength of Normal Concrete. **Multidiciplinary Output Research For Actual and International Issues MORFAI JOURNAL**, 3(1), 104–116.
- Fernando, V., & Hunggurami, E. (2023). Pengaruh Perawatan Beton (Curing) menggunakan *Water Curing* dan Membrane Curing terhadap Kuat Tekan Beton. **Jurnal Teknik Sipil**, 12(2), 139–140.
- Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). *Normality Tests for Statistical Analysis: A*

Guide for Non-Statisticians Asghar. International Journal of Endocrinology and Metabolism, 10(2), 486–489. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>

Gonçalves, R. M., Martinho, A., & Oliveira, J. P. (2022). *Recycling of Reinforced Glass Fibers Waste : Current Status. Dmc*, 1–18.

Gopalraj, S. K., & Kärki, T. (2020). *A Review on the Recycling of Waste Carbon Fibre / Glass Fibre - Reinforced Composites : Fibre Recovery , Properties and Life - Cycle Analysis. SN Applied Sciences*, 2(3), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4>

Gunawan, G., & Nono. (2019). Potensi Pemanfaatan Bahan Limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* untuk Lapisan Fondasi Jalan Semen (*Potential For Utilization Of Fly Ash And Bottom Ash Waste Materials For Cement Road Foundation*). **Jurnal Jalan-Jembatan**, 36(21), 22.

Halliwell, S. (2010). *FRPs – The Environmental Agenda. 13(5)*, 783–791.

Hamdi, F., Lapian, F. E., Tumpu, M., Mansyur, Irianto, Mabui, D. S. S., Raidyarto, A., Sila, A. A., Masdiana, Rangan, P. R., & Hamkah. (2022). Teknologi Beton (Irianto, M. T. Mansyur, & Mahyuddin (ed.); I). **CV. TOHAR MEDIA**.

Harahap, S. (2021). Analisa Perbandingan Biaya serta Waktu Pelaksanaan Material Dinding Batu Bata dan Batako pada Rumah Type 36. **Jurnal Education and development**, 9(3), 20–26.

Hardani, Auliya, N. H., Andriani, H., Fardani, R. A., Ustiawaty, J., Utami, E. F., Sukmana, D. J., & Istiqomah, R. R. (2020). Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif (H. Abadi (ed.); I). **CV. Pustaka Ilmu Group**.

Herastuti, K. A., & Ira, N. P. (2016). Studi Analisis Pengaruh Variasi Ukuran Butir Batuan terhadap Sifat Fisik dan Nilai Kuat Tekan. **Prosiding Seminar**

Nasional XI “Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi 2016.

- Irawan, R. R. (2017). Kajian Sifat Kimia , Fisika , dan Mekanik Semen Portland Di Indonesia (*Assesment Of Chemical , Physical , and Mechanical Properties Of Indonesian Portland Cements*). **Jurnal Jalan-Jembatan**, 34(2). 79–90.
- Irwan, A. F. (2025). Limbah FRP dari Pembuatan Kapal: Studi Kasus di Galangan CV. Cisanggarung Putra Mandiri Jakarta Utara. **SKRIPSI**.
- Islam, N., Noaman, A., & Saiful, K. (2024). *Heliyon Mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete with raw fly ash as a partial replacement of cement*. **Heliyon**, 10(7), e28904. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28904>
- Jierula, A., Li, H., Chen, Y., Wu, C., Wu, X., & Yin, H. (2024). *Study on the Influence of Density and Water – Cement Ratio on the Cement Utilization , Fluidity , Mechanical Properties , and Water Absorption of Foam Concrete*. 1–17.
- Kaboré, M. W., Perrin, D., Idir, R., Ienny, P., Garcia-diaz, É., & Bitouri, Y. El. (2025). *A Review on the Valorization of Recycled Glass Fiber-Reinforced Polymer (rGFRP) in Mortar and Concrete : A Sustainable Alternative to Landfilling*. 1–22.
- Karim, M. A., Seo, Y., Alamayreh, I., & Suttle, S. (2025). *Optimizing the Use of Fly Ash as Partial Replacement of Fine Aggregate and Cement in Portland Cement Concrete Mixes*. 1–17.
- Karimah, R., Abadi, K., Ridwan, M., & Kamila, I. L. (2023). Tinjauan Kuat Tekan Dan Absorpsi Mortar Yang Mengandung Air Garam (*Review Of The Compressive Strength And Absorbtion Of Mortars Containing Baline*). **Media Ilmiah Teknik Sipil**, 11(1), 68–73.

- Khalilabad, E. H., Emparanza, A. R., Caso, F. De, Roghani, H., Nanni, A., & Khodadadi, N. (2023). *Characterization Specifications for FRP Pultruded Materials : From Constituents to Pultruded Profiles*. **Fibers**, 11(93). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fib11110093>
- Kurniwanto. (2020). Pengaruh Penggunaan Kapur Padam sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen terhadap Kuat Tekan Batako pada Jenis Pasir yang Berbeda Tugas. **PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS ISLAM RIAU**.
- Mohammed, A. A. (2017). *Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete*. **Construction and Building Materials**, 155, 593–604. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.096>
- Mursyid, I. A., Dewantoro, F., & Zain, A. (2026). Pengaruh Ukuran Butir Pasir terhadap Kuat Tekan Beton K-150. **Jurnal Civil Engineering Study**, 6(1), 352–362.
- Mustafa, M. A., Hana, I., Mahmoud, R., & Tayeh, B. A. (2019). *Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete : experiment and simulation*. 20(April), 519–526. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.06.008>
- Nafiah, A. N., Legasari, L., & Anaser, N. (2025). Pengaruh Suhu dan Kelembapan terhadap Nilai *Setting Time* pada Semen PCC (*Portland Composite Cement*) dan OPC (*Ordinary Portland Cement*). 3(01), 32–41.
- Nastain, & Yanuar, H. (2023). Karakteristik Batako *Self Compacting Concrete* (SCC) Limbah Ban Bekas untuk Material Dinding Bangunan Ramah Lingkungan. **TECHNO**, 24(1).

Nurhadi, A. N. A., Damayanti, M., & Nugroho, D. H. (2024). Penggunaan Material Limbah untuk Pembangunan Berkelanjutan pada Kontruksi Jalan Raya (*Use of Waste Materials for Sustainable Development in Highway Construction*). **DAKTILITAS: Jurnal Teknik Sipil Universitas Tulungagung**, 04, 74–82.

Nursabrina, A., Joko, T., & Septiani, O. (2021). Kondisi Pengelolaan Limbah B3 Industri di Indonesia dan Potensi Dampaknya : *Studi Literatur The Condition of Industrial Hazardous Waste Management in Indonesia and Its*. **JURNAL RISET KESEHATAN**, 13(1), 80–90.

Pah, J. J. S., Tulle, P. M., Bella, R. A., & Sina, D. A. T. (2022). Hubungan Faktor Air-Semen dan Faktor Air-Foam terhadap Kuat Tekan dan Berat Volume Bata Ringan CLC. **Jurnal Teknik Sipil**, 11(2), 119–132.

Panennungi, T., & Pertiwi, N. (2019). Ilmu Bahan Bangunan (II). **Badan Penerbit Universitas Negeri Makassar**.

Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021, 70 (2021).

Pertiwi, D., Wibowo, B., Kasiati, E., Triaswati, & Sabban, A. G. (2011). Perbandingan Penggunaan Pasir Lumajang dengan Pasir Gunung Merapi terhadap Kuat Tekan Beton. **Jurnal APLIKASI: Media Informasi & Komunikasi Aplikasi Teknik Sipil Terkini Halaman**, 9, 13–22.

Pratiwi, W. D., Triwulan, Ekaputri, J. J., & Fansuri, H. (2020). *Combination of Precipitated-Calcium Carbonate Substitution and Dilute-Alkali Fly Ash Treatment in A Very High-Volume Fly Ash Cement Paste*. **Construction and Building Materials**, 234, 1–12.

PU. (1982). *Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia (PUBI - 1982)*. Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal Cipta Karya.

- Purnomo, & Sutadji, E. (2022). *Analisi Data Multivariat (I)*. **Omera Pustaka**.
- Purwati, A., As'ad, S., & Sunarmasto. (2014). Pengaruh Ukuran Butiran Agregat terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton Kinerja Tinggi Grade 80. **Matriks Teknik Sipil**, 2(2), 58–63.
- Putra, B. R., Mangalla, L. K., & Gunawan, Y. (2021). Analisis Pengaruh Nilai Kalor Batubara Dan Excess Air Terhadap Efisiensi Boiler. **ENTHALPY: Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin Journal**, 6(1), 12–17.
- Putri, E. C., & Rachmansyah. (2023). Pengaruh Penambahan Superplasticizer terhadap Nilai Modulus. **HYPOTHESIS: Multidisciplinary Journal Of Social Sciences**, 6(3), 635–644.
- Qureshi, J. (2022). *A Review of Recycling Methods for Fibre Reinforced Polymer Composites*. **Sustainability**, 5.
- Rahayu, P., Mariyamah, Anase, N., & Safaruddin. (2025). Pengaruh *Fly Ash* terhadap Kadar SO_3 dan Waktu Ikut Semen. **HYPOTHESIS: Multidisciplinary Journal Of Social Sciences**, 4(1), 48–56.
- Rajiman. (2020). AGREGAT BETON: Substitusi Pasir Besi dalam Agregat Halus dengan Agregat Kasar Batu Basalt Scoria (S. Apriyanto (ed.); I). **CV. SULUR PUSTAKA**.
- Ramadhan, M. N., Widodo, V. N. T., & Estikhamah, F. (2025). Optimalisasi Air Es Dan Fly Ash Untuk Mengendalikan Suhu Beton Segar Akibat Aditif Kimia Serta Dampaknya Terhadap. **Jurnal Teknik Sipil**, 18(2), 324–333.
- Rilya, R., & Sudarno. (2020). Kuat Tekan , Kuat Lentur dan Daya Serap Air untuk Batako dengan Penambahan Serat Sabut Kelapa. 2(3), 48–57.

Riyanto, H. (2015). Pengaruh Penggunaan Semen Pozzolan Tipe-A terhadap Kuat Tekan Beton. **Jurnal Teknik Sipil UBL**, 2(26).

Rucka, M., & Kurpińska, M. (2025). *Sustainable cement-based mortar with shredded material recycled from end-of-life wind turbine blades*. 1–15.

Santoso, H. T., Hidayatiningrum, L. F., Utomo, A. B., Hartono, J., & Masrianto. (2021). Analisa Korelasi antara Frekuensi dengan Bentang Jembatan Berdasar Uji Dinamik (*Correlation Analysis Between Frequency and Bridge Span base on Dynamic Test*). **Jurnal Jalan-Jembatan**, 38(1), 65.

Saputra, H. G., Amiruddin, W., & Chirmsianto, D. (2022). Analisis Perbedaan Nilai Hambatan Redesain Kapal Ikan Kayu Tambak Lorok Menjadi Kapal Fiberglass. **Jurnal Teknik Perkapalan**, 10(4), 41–48.

Sari, N. F. A., Cahyono, L., Rosalina, A., Sholihah, M., Rismawati, R., Gastriani, O. P., & Febianto, M. A. (2025). Pemanfaatan Limbah Sandblasting Industri Perkapalan menjadi Produk Bata Beton Pejal Mendukung Material Hijau. **Nusantara Hasana Journal**, 5(4), 182–187.

Sari, W. P., Yandi, S., Purnama, S. A., Putri, K., & Putri, A. A. (2022). Uji Kandungan E Glass Fiber Non Dental dengan Menggunakan Teknik X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) (*Test Content Of Non Dental E Glass Fiber Using X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) Technique*). *XVI*(01), 122–128.

Sianturi, R. (2025). Uji Normalitas sebagai Syarat Pengujian Hipotesis. **Jurnal Pembelajaran dan Matematika**, 11(1), 1–14.
<https://doi.org/https://doi.org/10.36987/jpms.v10i2.5881>

Steliga, T., Uliasz, M., Kotwica, L., & Kremieniewski, M. (2018). *Assessment of mechanical parameters and physical and chemical properties of solidified*

drilling-related waste. Gospodarka Surowcami Mineralnymi - Mineral Resources Management, 34(1), 97–118. <https://doi.org/10.24425/118645>

Sugiyono. (2013). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif Dan R & D. **ALFABETA BANDUNG**.

Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., Hooton, R. D., Ghwhuplqh, W. R., Vxlwdelolw, W. K. H., Dvk, R. I. D. À., Iru, V., Lq, X. V. H., Frxog, W., Vrph, L., Wkh, R. I., Sureohpdwlf, P., & Ri, F. (2021). *TECHNICAL PAPER ASTM C618 Fly Ash Specification : Comparison with Other Specifications , Shortcomings , and Solutions. 118*, 157–167.

Tao, Y., Hadigheh, S. A., & Wei, Y. (2023). *Recycling of glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite wastes in concrete : A critical review and cost benefit analysis. Structures*, 53(June 2022), 1540–1542. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.018>

Tefnai, M. A., Hunggurami, E., & Frans, J. H. (2025). Pengaruh Penambahan Air dan Air Semen untuk Nilai Kuat Tekan Beton Normal dan Mortar. **Jurnal Tekni Sipil**, 14(2), 145–152.

Thomoglou, A. K., Falara, M. G., Chalioris, C. E., Gkountakou, F. I., & Elenas, A. (2022). *Influence of Different Surfactants on Carbon Fiber Dispersion and the Mechanical Performance of Smart Piezoresistive Cementitious Composites*.

Triana, A. P., Gunawan, G., & Prawesti, P. (2021). Kajian Aspek Lingkungan Pemanfaatan Agregat Tailing Modada Sebagai Material Bidang Jalan (*Environmental Study On The Utilization Of Tailing Aggregate Modada As A Road Infrastructure Material*). **Jurnal Jalan-Jembatan**, 11–20.

Umar. (2025). Pengaruh Metode Perawatan Beton Terhadap Mutu Beton Ditinjau Dari Kuat Tekan, Modulus Elastisitas Dan Kuat Lentur (*The Effect Of*

Concrete Care Method On Concrete Quality In Terms Of Compressive Strength, Modulus Of Elasticity And Flexible Strength). Program Studi Teknik Sipil Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Usman, Y. (2024). Penerapan Konsep Struktur RIMAE FABA pada Pembangunan Rumah Hunian Sederhana sebagai Inovasi Eco-Material. **Live and Applied Science**, 4, 2–6.

Wahyuning, S. (2021). Dasar-Dasar Statistik (I. A. Dianta (ed.)). **Yayasan Prima Agus Teknik Redaksi**:

Wang, L., Lu, X., Liu, L., Xiao, J., Zhang, G., Guo, F., & Li, L. (2022). *Influence of MgO on the Hydration and Shrinkage Behavior of Low Heat Portland Cement-Based Materials via Pore Structural and Fractal Analysis*. **Fractal and Fractional Article**, 6(40), 5–7.

Wibowo, A. P., & Saidani, M. (2023). *Mortar with fly ash as a partial cement replacement : analysing the compressive strength and heat of hydration*. 05033.

Wijaya, T., & Budiman, S. (2016). Penelitian Manajemen (B. Rahmat & B. Setyoseno (ed.); I). **Percetakan Pohon Cahaya**.

Yan, R., Yin, S., Zhang, H., Wang, L., & Chen, D. (2023). *Case Studies In Construction Materials Effect Of Superplasticizer On The Setting Behaviors And Mechanical Properties Of Tailings-Waste Rock Cemented Paste Backfills*. **Case Studies in Construction Materials**, 18(November 2022), e01714. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01714>

Zein, K. C. S., Meillyta, & Wahyuni. (2018). Substitusi *Fly Ash* pada Semen terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi. **Seminar Nasional Teknologi**

Terapan VI 2018, VI, 205–212.

Zhao, T., Lv, Y., Chen, J., Song, P., Sun, M., Zhang, X., & Huang, L. (2023). *Effect of Glass Fiber-Reinforced Plastic Waste on the Mechanical Properties of Concrete and Evaluation of Its Feasibility for Reuse in Concrete Applications*. **Materials**, 16.

Halaman sengaja dikosongkan

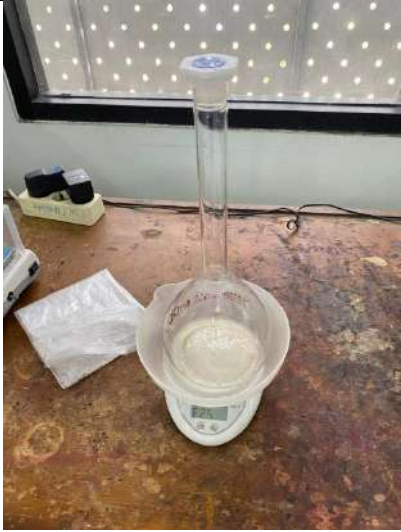
Lampiran A
Dokumentasi Kegiatan Penelitian

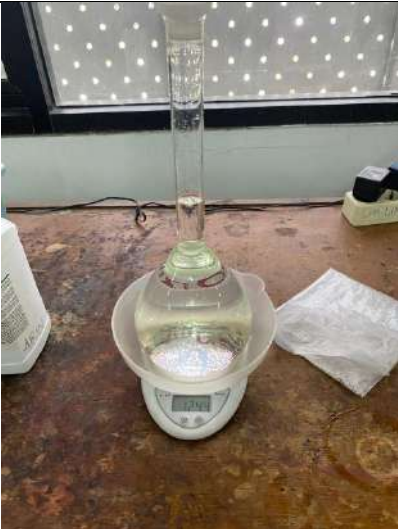
Halaman sengaja dikosongkan

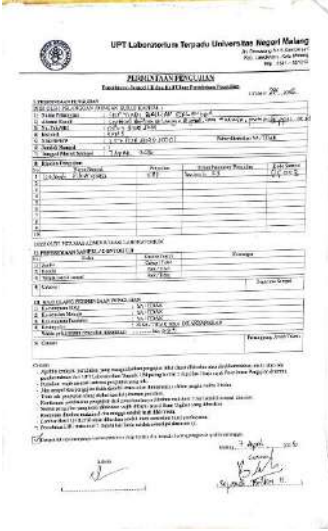
Dokumentasi Kegiatan Penelitian

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
1	Persiapan Material	 Mesin penggiling
		 GFRP sebelum digiling

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		 Bentuk limbah GFRP setelah proses penggilingan
		 Pengayakan Pasir Lumajang
		 <i>Superplasticizer</i> merek Sika Voscocrete 3115n

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
2	Pengujian densitas dan penyerapan air agregat halus	 Penimbangan Berat Kosong Labu Ukur
		 Penimbangan Labu Ukur + Air + Sampel

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		 Penimbangan Berat Labu Ukur + Air
		 Penimbangan agregat halus SSD
		 Pengovenan material

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		 Pengukuran densitas limbah GFRP
	Pengujian XRF limbah GFRP	
3	Pengujian vicat pada Binder	 Pengujian waktu ikat awal dan waktu ikat akhir pada pasta semen dan pasta semen + fly ash

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
4	Analisis ayakan	 Analisis ayakan dilakukan selama 15 menit
5	Pembuatan sampel uji	 Penimbangan limbah GFRP
		 Penimbangan pasir

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		 Penimbangan semen
		 Pemberian lapisan oli pada cetakan
		 Proses <i>mixing</i> menggunakan molen

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		 Pencetakan bata beton secara manual  Perawatan (curing) bata beton
6.	Benda Uji	 Variasi Kontrol (BFF00)

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		 Variasi 2,5% Limbah GFRP (BFF02)  Variasi 5% Limbah GFRP (BFF05)  Variasi 7,5% Limbah GFRP (BFF075)

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		 Variasi 2,5% Limbah GFRP dengan 30% FA (BFF32)  Variasi 5% Limbah GFRP dengan 30% FA (BFF35)  Variasi 7,5% Limbah GFRP dengan 30% FA (BFF375)

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
7.	Pengujian Penyerapan Air dan Densitas Bata Beton	Perendaman selama 24 jam Penimbangan di dalam air

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		Penimbangan pada kondisi jenuh kering permukaan Pengovenan 24 jam

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		 Penimbangan kering oven
8.	Pengujian Kuat Tekan	 Pengukuran dimensi bata beton

No.	Deskripsi Kegiatan	Dokumentasi Kegiatan
		 Pengujian kuat tekan menggunakan UTM
9.	Pengujian TCLP	 Sampel TCLP

Lampiran B

Hasil Pengujian Agregat Halus (Berat Jenis, Daya Serap Air, Kadar Lumpur Pasir dan Gradasi Agregat Halus) dan Binder (Berat Jenis, Ukuran Partikel, dan Waktu Ikat)

Halaman sengaja dikosongkan

Lampiran B

Metode pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus mengacu pada SNI 1970:2008, sedangkan metode pengujian analisis ayakan untuk menentukan zona agregat mengacu pada ASTM C136-01.

B. Pasir

1. Berat Jenis dan Penyerapan Air

a) Sampel I

$$\text{Massa pasir SSD (S)} = 500 \text{ g}$$

$$\text{Massa labu + Pasir + Air (C)} = 956 \text{ g}$$

$$\text{Massa pasir kering oven (A)} = 496 \text{ g}$$

$$\text{Massa labu + Air (B)} = 642 \text{ g}$$

Perhitungan

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis curah kering (S}_d\text{)} &= \frac{496 \text{ g}}{642 \text{ g} + 500 \text{ g} - 956 \text{ g}} \\ &= 2,67 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis curah jenuh kering} \\ \text{permukaan (S}_s\text{)} &= \frac{500 \text{ g}}{642 \text{ g} + 500 \text{ g} - 956 \text{ g}} \\ &= 2,75 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu (S}_a\text{)} &= \frac{496 \text{ g}}{642 \text{ g} + 496 \text{ g} - 956 \text{ g}} \\ &= 2,73 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan air (S}_w\text{)} &= \left[\frac{500 \text{ g} - 496 \text{ g}}{496 \text{ g}} \right] \times 100\% \\ &= 0,81\% \end{aligned}$$

b) Sampel II

$$\text{Massa pasir SSD (S)} = 500 \text{ g}$$

$$\text{Massa labu + Pasir + Air (C)} = 941 \text{ g}$$

$$\text{Massa pasir kering oven (A)} = 489 \text{ g}$$

$$\text{Massa labu + Air (B)} = 642 \text{ g}$$

Perhitungan

$$\begin{aligned}
 \text{Berat jenis curah kering (S}_d\text{)} &= \frac{489 \text{ g}}{642 \text{ g} + 500 \text{ g} - 941 \text{ g}} \\
 &= 2,43 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Berat jenis curah jenuh kering permukaan (S}_s\text{)} &= \frac{500 \text{ g}}{642 \text{ g} + 500 \text{ g} - 941 \text{ g}} \\
 &= 2,63 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Berat jenis semu (S}_a\text{)} &= \frac{489 \text{ g}}{642 \text{ g} + 489 \text{ g} - 941 \text{ g}} \\
 &= 2,57 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Penyerapan air (S}_w\text{)} &= \left[\frac{500 \text{ g} - 496 \text{ g}}{496 \text{ g}} \right] \times 100\% \\
 &= 2,25 \%
 \end{aligned}$$

c) Sampel III

$$\begin{aligned}
 \text{Massa pasir SSD (S)} &= 500 \text{ g} \\
 \text{Massa labu + Pasir + Air (C)} &= 954 \text{ g} \\
 \text{Massa pasir kering oven (A)} &= 489 \text{ g} \\
 \text{Massa labu + Air (B)} &= 642 \text{ g}
 \end{aligned}$$

Perhitungan

$$\begin{aligned}
 \text{Berat jenis curah kering (S}_d\text{)} &= \frac{489 \text{ g}}{642 \text{ g} + 500 \text{ g} - 954 \text{ g}} \\
 &= 2,60 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Berat jenis curah jenuh kering permukaan (S}_s\text{)} &= \frac{500 \text{ g}}{642 \text{ g} + 500 \text{ g} - 954 \text{ g}} \\
 &= 2,82 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Berat jenis semu (S}_a\text{)} &= \frac{489 \text{ g}}{642 \text{ g} + 489 \text{ g} - 954 \text{ g}} \\
 &= 2,76 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Penyerapan air (S}_w\text{)} &= \left[\frac{500 \text{ g} - 489 \text{ g}}{489 \text{ g}} \right] \times 100\% \\
 &= 2,25 \%
 \end{aligned}$$

d) Sampel Rata – Rata

$$\begin{aligned}\text{Massa pasir SSD (S)} &= 500 \text{ g} \\ \text{Massa labu + Pasir + Air (C)} &= 950,33 \text{ g} \\ \text{Massa pasir kering oven (A)} &= 491,33 \text{ g} \\ \text{Massa labu + Air (B)} &= 642 \text{ g}\end{aligned}$$

Perhitungan

$$\begin{aligned}\text{Berat jenis curah kering (S}_d\text{)} &= \frac{491,33 \text{ g}}{642 \text{ g} + 500 \text{ g} - 950,33 \text{ g}} \\ &= 2,56 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Berat jenis curah jenuh kering} &= \frac{500 \text{ g}}{642 \text{ g} + 500 \text{ g} - 950,33 \text{ g}} \\ \text{permukaan (S}_s\text{)} &= 2,73 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Berat jenis semu (S}_a\text{)} &= \frac{491,33 \text{ g}}{642 \text{ g} + 489 \text{ g} - 950,33 \text{ g}} \\ &= 2,68 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Penyerapan air (S}_w\text{)} &= \left[\frac{500 \text{ g} - 491,33 \text{ g}}{491,33 \text{ g}} \right] \times 100\% \\ &= 1,76 \%\end{aligned}$$

2. Kadar Lumpur Pasir Lumajang

Berat Kering Oven (gram)	300,87	318,922	305,93
Berat Kering Oven Setelah Pencucian (gram)	285,82	303,84	293,46
Total Kadar Lumpur (gram)	15,05	15,08	12,47
Presentase Kadar Lumpur	5,00%	4,73%	4,08%
Rata-rata			4,60%

Perhitungan kadar lumpur Pasir Lumajang diperoleh melalui perhitungan matematis berikut.

1) Sampel I

$$\begin{aligned}\text{Total Kadar Lumpur} &= \text{Berat kering oven} - \text{Berat kering oven} \\ &\quad \text{setelah cuci} \\ &= 300,87 \text{ gram} - 285,82 \text{ gram}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 15,05 \text{ gram} \\
 \text{Persentase Kadar Lumpur} &= \frac{\text{Total kadar lumpur}}{\text{Berat kering oven}} \times 100 \\
 &= \frac{15,05 \text{ gram}}{300,87 \text{ gram}} \times 100 \\
 &= 5\%
 \end{aligned}$$

2) Sampel II

$$\begin{aligned}
 \text{Total Kadar Lumpur} &= \text{Berat kering oven} - \text{Berat kering oven setelah cuci} \\
 &= 318,922 \text{ gram} - 303,84 \text{ gram} \\
 &= 15,08 \text{ gram} \\
 \text{Persentase Kadar Lumpur} &= \frac{\text{Total kadar lumpur}}{\text{Berat kering oven}} \times 100 \\
 &= \frac{15,08 \text{ gram}}{318,922 \text{ gram}} \times 100 \\
 &= 4,73\%
 \end{aligned}$$

3) Sampel III

$$\begin{aligned}
 \text{Total Kadar Lumpur} &= \text{Berat kering oven} - \text{Berat kering oven setelah cuci} \\
 &= 305,93 \text{ gram} - 293,46 \text{ gram} \\
 &= 12,47 \text{ gram} \\
 \text{Persentase Kadar Lumpur} &= \frac{\text{Total kadar lumpur}}{\text{Berat kering oven}} \times 100 \\
 &= \frac{12,47 \text{ gram}}{305,93 \text{ gram}} \times 100 \\
 &= 4,08\%
 \end{aligned}$$

4) Rata-Rata

$$\begin{aligned}
 \text{Persentase Kadar Lumpur} &= \frac{\text{Sampel I} + \text{Sampel II} + \text{Sampel III}}{3} \\
 &= \frac{5\% + 4,73\% + 4,08\%}{3} \\
 &= 4,6\%
 \end{aligned}$$

3. Gradasi Agregat Halus Pasir Lumajang

Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)			rata-rata
	I	II	III	
4,75	2	3	4	3,00
2,3	69	52	73	64,67
1,18	197	142	151	163,33
0,6	317	156	173	215,33
0,3	366	240	221	275,67
0,15	49	315	282	215,33
PAN	0	92	96	62,67
Total	1000	1000	1000	

Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Berat Lolos (gram)	Jumlah Persentase (%)			
			Tertahan	Lolos	Lolos Kumulatif	Tertahan Kumulatif
A	B	C	$D = \frac{(B/1000) * 100}{100}$	$E = \frac{(C/1000) * 100}{100}$	F	G
4,75	3,00	997,00	0,30	100,00	99,70	0,30
2,30	64,67	932,00	6,47	93,00	93,23	6,77
1,18	163,33	769,00	16,33	77,00	76,90	23,10
0,60	215,33	554,00	21,53	55,00	55,37	44,63
0,30	275,67	278,00	27,57	28,00	27,80	72,20
0,15	215,33	63,00	21,53	6,00	6,27	93,73
PAN	62,67		6,27			100,00
Total	1000,00					
<i>Fine Modulus (FM)</i>	2,41					

Keterangan : *Fine modulus* berkisar antara 2,3 – 3,1 (ASTM C-33)

C. Limbah GFRP

1. Berat Jenis dan Penyerapan Air

a) Sampel I

Massa GFRP SSD (S)	= 233 g
Massa labu + GFRP + Air (C)	= 702 g
Massa GFRP kering oven (A)	= 202 g
Massa labu + Air (B)	= 692 g

Perhitungan

$$\begin{aligned}\text{Berat jenis curah kering (S}_d\text{)} &= \frac{202 \text{ g}}{692 \text{ g} + 233 \text{ g} - 702 \text{ g}} \\ &= 0,91 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Berat jenis curah jenuh kering} \\ \text{permukaan (S}_s\text{)} &= \frac{233 \text{ g}}{692 \text{ g} + 233 \text{ g} - 702 \text{ g}} \\ &= 1,21 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Berat jenis semu (S}_a\text{)} &= \frac{202 \text{ g}}{692 \text{ g} + 202 \text{ g} - 702 \text{ g}} \\ &= 1,05 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Penyerapan air (S}_w\text{)} &= \left[\frac{500 \text{ g} - 496 \text{ g}}{496 \text{ g}} \right] \times 100\% \\ &= 15,35\%\end{aligned}$$

b) Sampel II

Massa GFRP SSD (S)	= 233 g
Massa labu + GFRP + Air (C)	= 707 g
Massa GFRP kering oven (A)	= 216 g
Massa labu + Air (B)	= 692 g

Perhitungan

$$\begin{aligned}\text{Berat jenis curah kering (S}_d\text{)} &= \frac{216 \text{ g}}{692 \text{ g} + 300 \text{ g} - 707 \text{ g}} \\ &= 0,99 \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat jenis curah jenuh kering permukaan (S}_s\text{)} &= \frac{233 \text{ g}}{692 \text{ g} + 233 \text{ g} - 707 \text{ g}} \\
 &= 1,16 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Berat jenis semu (S}_a\text{)} &= \frac{216 \text{ g}}{692 \text{ g} + 216 \text{ g} - 707 \text{ g}} \\
 &= 1,07 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Penyerapan air (S}_w\text{)} &= \left[\frac{233 \text{ g} - 216 \text{ g}}{216 \text{ g}} \right] \times 100\% \\
 &= 7,87 \%
 \end{aligned}$$

c) Sampel III

$$\begin{aligned}
 \text{Massa GFRP SSD (S)} &= 233 \text{ g} \\
 \text{Massa labu + GFRP + Air (C)} &= 709 \text{ g} \\
 \text{Massa GFRP kering oven (A)} &= 217 \text{ g} \\
 \text{Massa labu + Air (B)} &= 692 \text{ g}
 \end{aligned}$$

Perhitungan

$$\begin{aligned}
 \text{Berat jenis curah kering (S}_d\text{)} &= \frac{217 \text{ g}}{692 \text{ g} + 233 \text{ g} - 709 \text{ g}} \\
 &= 1,00 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Berat jenis curah jenuh kering permukaan (S}_s\text{)} &= \frac{233 \text{ g}}{692 \text{ g} + 233 \text{ g} - 709 \text{ g}} \\
 &= 1,17 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Berat jenis semu (S}_a\text{)} &= \frac{217 \text{ g}}{692 \text{ g} + 217 \text{ g} - 709 \text{ g}} \\
 &= 1,09 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Penyerapan air (S}_w\text{)} &= \left[\frac{233 \text{ g} - 217 \text{ g}}{217 \text{ g}} \right] \times 100\% \\
 &= 7,37 \%
 \end{aligned}$$

d) Sampel Rata – Rata

$$\begin{aligned}
 \text{Massa GFRP SSD (S)} &= 233 \text{ g} \\
 \text{Massa labu + GFRP + Air (C)} &= 706 \text{ g} \\
 \text{Massa GFRP kering oven (A)} &= 211,67 \text{ g}
 \end{aligned}$$

$$\text{Massa labu} + \text{Air (B)} = 692 \text{ g}$$

Perhitungan

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis curah kering (S}_d\text{)} &= \frac{211,67 \text{ g}}{692 \text{ g} + 233 \text{ g} - 706 \text{ g}} \\ &= 0,97 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis curah jenuh kering permukaan (S}_s\text{)} &= \frac{233 \text{ g}}{692 \text{ g} + 233 \text{ g} - 706 \text{ g}} \\ &= 1,18 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu (S}_a\text{)} &= \frac{211,67 \text{ g}}{692 \text{ g} + 211,67 \text{ g} - 706 \text{ g}} \\ &= 1,07 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan air (S}_w\text{)} &= \left[\frac{233 \text{ g} - 211,67 \text{ g}}{211,67 \text{ g}} \right] \times 100\% \\ &= 10,08 \% \end{aligned}$$

2. Gradasi Agregat Halus Limbah GFRP

Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)			rata-rata
	I	II	III	
4,75	11	14	13	12,7
2,3	26	23	21	23,3
1,18	41	44	43	42,7
0,6	66	67	65	66,0
0,3	43	44	46	44,3
0,15	32	31	34	32,3
PAN	31	27	28	28,7
Total	250	250	250	

Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Berat Lolos (gram)	Jumlah Persentase (%)			
			Tertahan	Lolos	Lolos Kumulatif	Tertahan Kumulatif
A	B	C	$D = \frac{(B/1000)}{100} \times 100$	$E = \frac{(C/1000)}{100} \times 100$	F	G
4,75	12,7	237,3	5,07	5,07	94,93	237,3

Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Berat Lolos (gram)	Jumlah Persentase (%)			
			Tertahan	Lolos	Lolos Kumulatif	Tertahan Kumulatif
2,30	23,3	214,0	9,33	14,40	85,60	214,0
1,18	42,7	171,3	17,07	31,47	68,53	171,3
0,60	66,0	105,3	26,40	57,87	42,13	105,3
0,30	44,3	61,0	17,73	75,60	24,40	61,0
0,15	32,3	28,7	12,93	88,53	11,47	28,7
PAN	28,7		11,47			0,0
Total	250					
<i>Fine Modulus (FM)</i>	2,73					

Keterangan : *Fine modulus* berkisar antara 2,3 – 3,1 (ASTM C-33)

Metode pengujian berat jenis semen dan *fly ash* mengacu pada SNI 15-2531-1991, pengujian ukuran partikel semen PCC dan *fly ash* dilakukan di Laboratorium Terpadu Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Brawijaya, dan pengujian vicat (waktu ikat) mengacu pada SNI 03-6827-2002.

A. Berat Jenis Semen PCC dan *Fly Ash*

1. Semen

Semen PCC			Sampel			Rata – Rata
Parameter Pengujian	Simbol	Rumus	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	Vf	-	100	100	100	100
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	W1	-	60,825	60,825	60,825	60,83
Berat Labu + Kerosin (Penuh) (gram)	W2	-	139,225	139,161	140,261	139,55
Berat Labu + Semen (gram)	W3	-	110,796	110,346	110,033	110,39
Berat Labu + Semen + Kerosin (gram)	W4	-	175,97	175,9	175,97	175,95
Massa Semen (gram)	Ms	W1 – W3	49,97	49,52	49,21	49,57
Massa Kerosin (Kapasitas Penuh) (gram)	Mk1	W1 – W2	78,4	78,34	79,44	78,72

Semen PCC			Sampel			Rata – Rata
Parameter Pengujian	Simbol	Rumus	I	II	III	
Kerapatan Kerosin (g/ml)	ρ_k	$\frac{V_f}{MK1}$	0,78	0,78	0,79	0,79
Massa Kerosin Sisa (Bersama Semen)	Mk2	W3 – W4	65,17	65,55	65,94	65,56
Volume Kerosin Sisa (ml)	Vk2	$\frac{\rho_k}{MK2}$	83,13	83,68	83,01	83,27
Volume Semen Aktual (ml)	Vs	Vf – Vk2	16,87	16,32	16,99	16,73
Kerapatan (Densitas) Semen (g/cm3)	ρ_s	$\frac{Ms}{Vs}$	2,96	3,03	2,9	2,96

2. Fly Ash

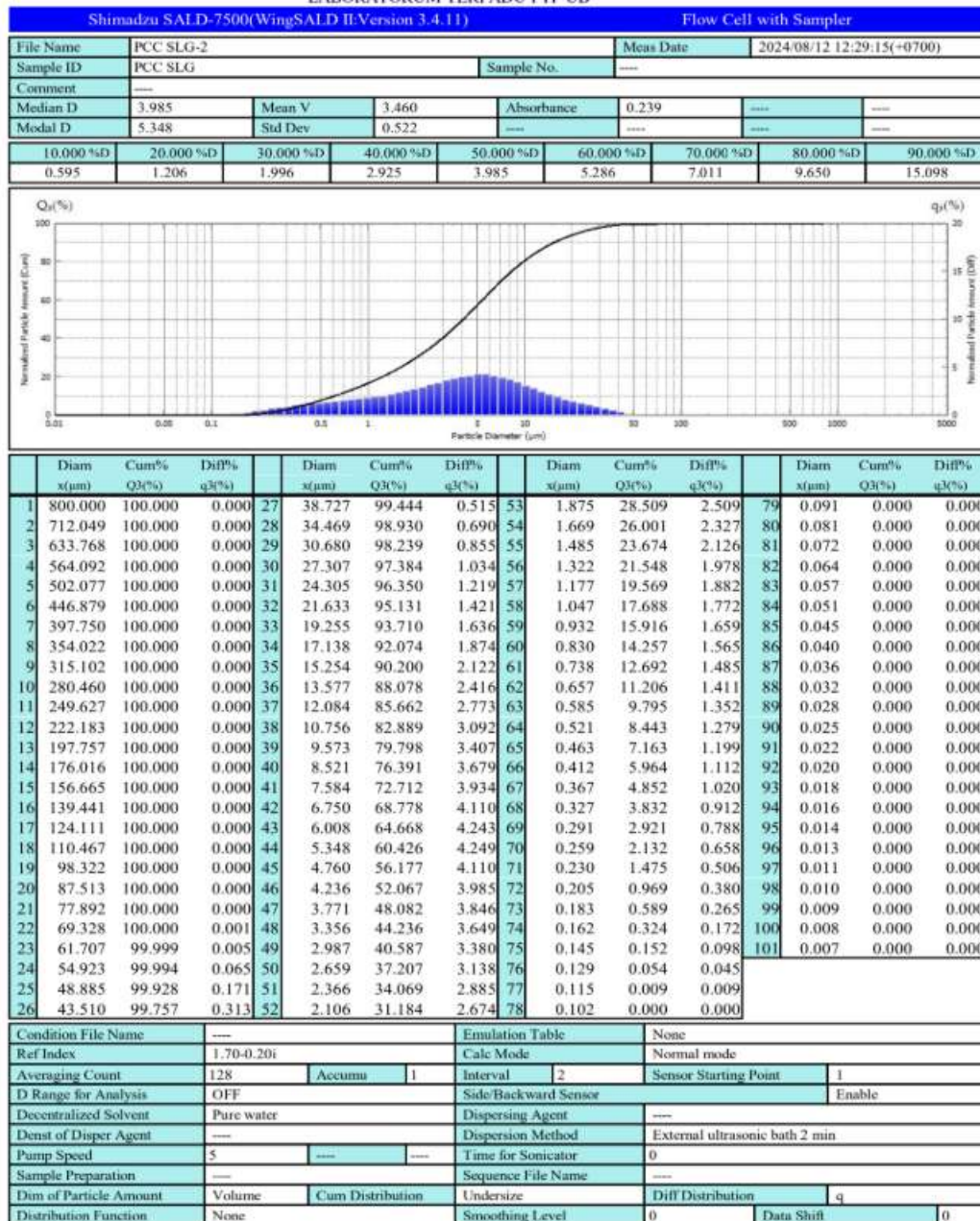
Fly Ash			Sampel			Rata – Rata
Parameter Pengujian	Simbol	Rumus	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	Vf	-	100	100	100	100,000
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	W1	-	60,666	60,666	60,666	60,666
Berat Labu + Kerosin (Penuh) (gram)	W2	-	139,161	139,161	139,161	139,161
Berat Labu + Fly ash (gram)	W3	-	130,666	130,666	130,326	130,553
Berat Labu + Fly ash + Kerosin (gram)	W4	-	185,572	185,716	185,225	185,504
Massa Fly ash (gram)	Ms	W1 – W3	70,00	70,00	69,66	69,89
Massa Kerosin (Kapasitas Penuh) (gram)	Mk1	W1 – W2	78,50	78,50	78,50	78,50
Kerapatan Kerosin (g/ml)	ρ_k	$\frac{V_f}{MK1}$	0,78	0,78	0,78	0,78
Massa Kerosin Sisa (Bersama Fly Ash)	Mk2	W3 – W4	54,91	55,05	54,90	54,95
Volume Kerosin Sisa (ml)	Vk2	$\frac{\rho_k}{MK2}$	69,95	70,13	69,94	70,01
Volume Fly ash Aktual (ml)	Vs	Vf – Vk2	30,05	29,87	30,06	29,99
Kerapatan (Densitas) Fly ash (g/cm3)	ρ_s	$\frac{Ms}{Vs}$	2,33	2,34	2,32	2,33

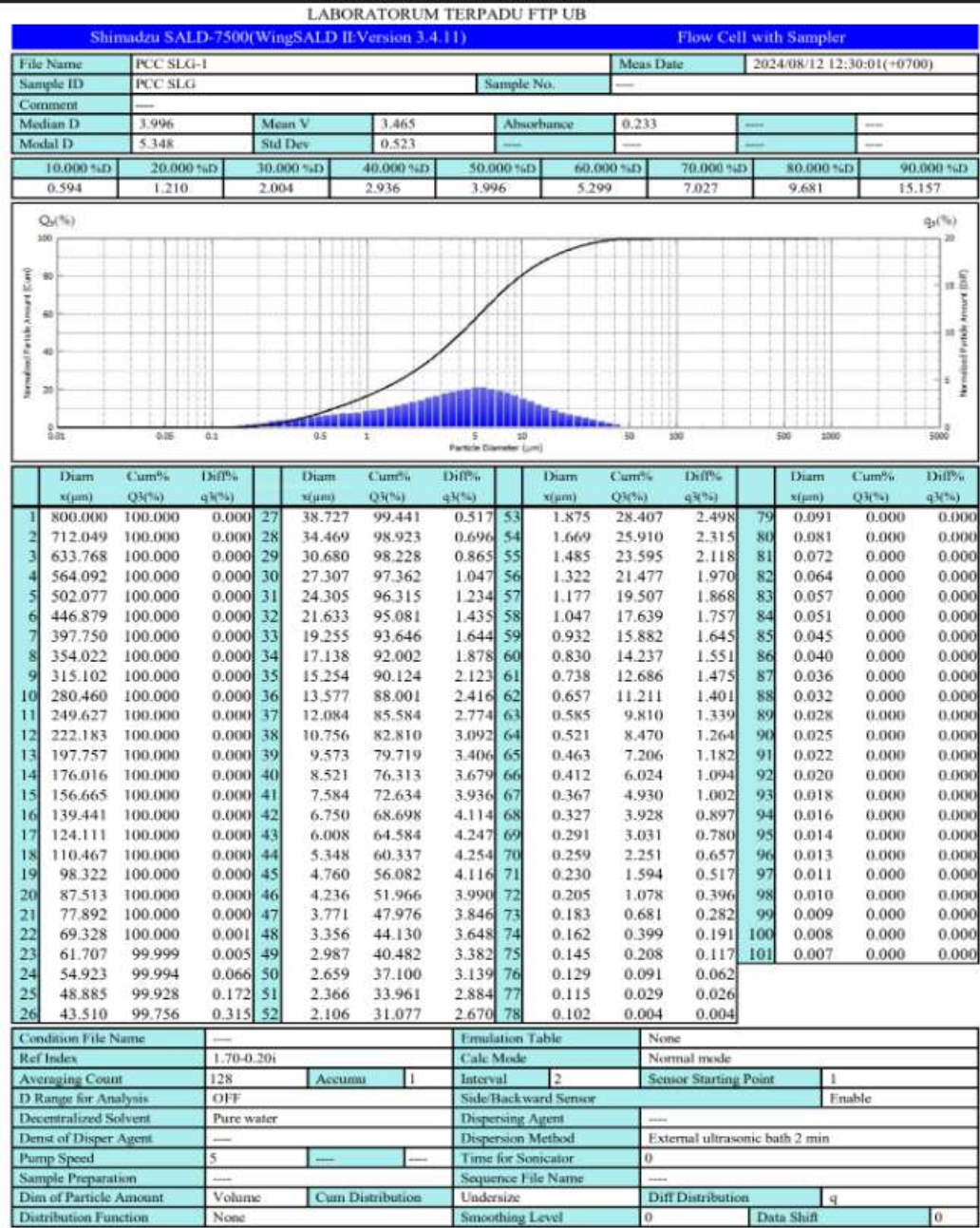
B. Hasil Pengujian Ukuran Partikel

1. Semen PCC

Kode Sampel	Median (μm)	Mean (μm)	Modul (μm)	Abs	Std Dev.
Semen PCC	3,996	3,465	5,348	0,233	0,523
	3,985	3,46	5,348	0,239	0,522

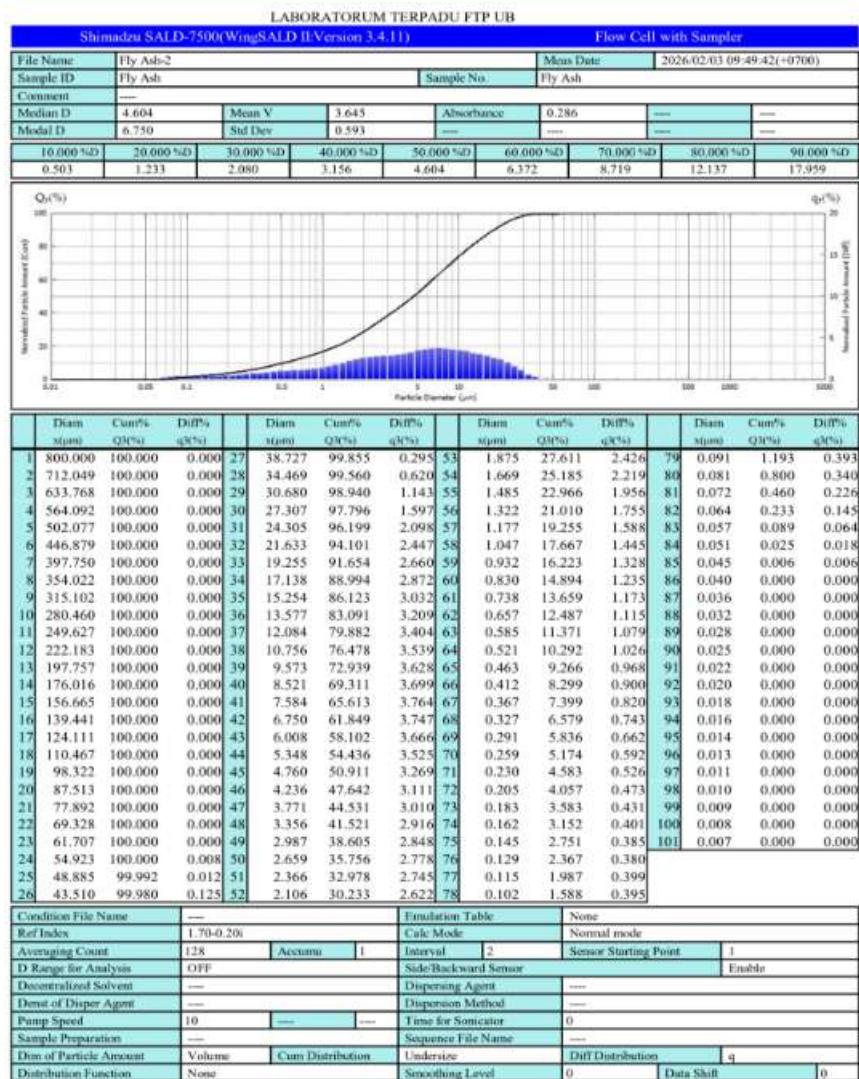
LABORATORIUM TERPADU FTP UB

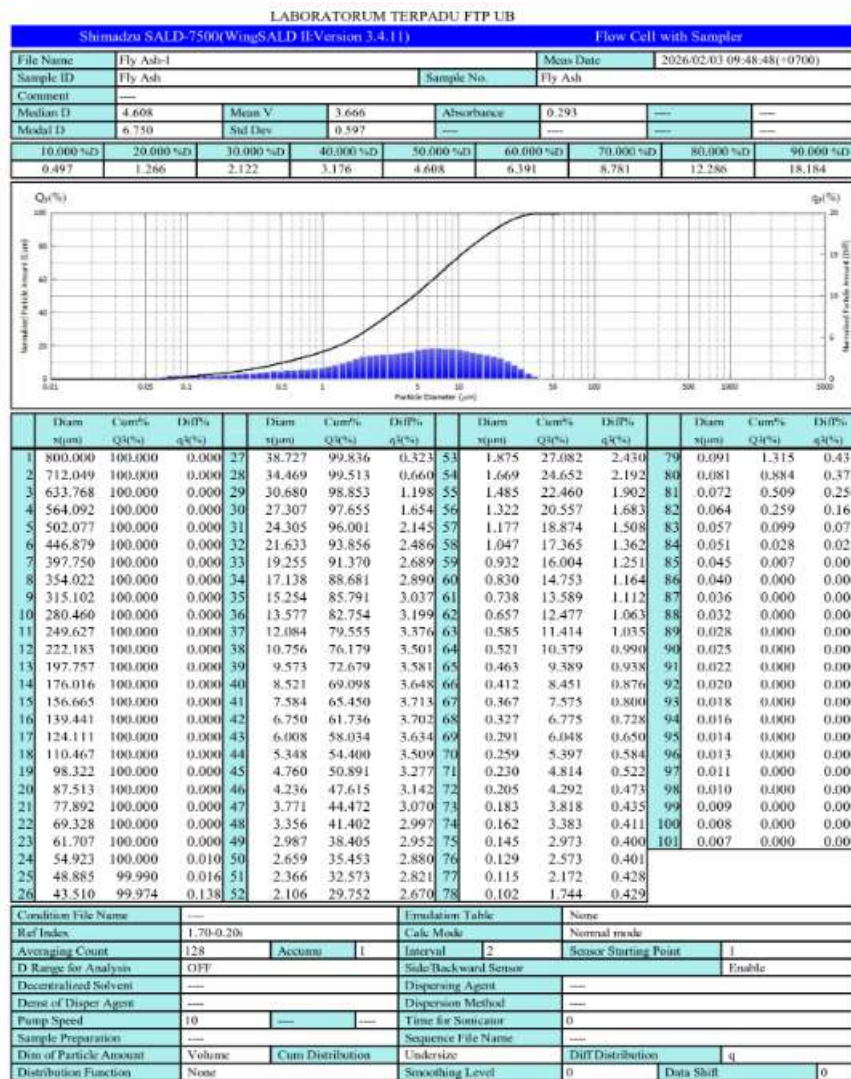




2. Fly Ash

Kode Sampel	Median (µm)	Mean (µm)	Modul (µm)	Abs	Std Dev.
Fly ash	4,608	3,666	6,75	0,293	0,597
	4,608	3,645	6,75	0,286	0,593





C. Waktu Ikat Binder

1. Semen

a) FAS 0.3

Waktu	Penetrasi (mm)
15	38
30	35
45	32
60	32
70	31
80	30
85	28
87	25

Waktu	Penetrasi (mm)	
90	23	← Waktu Ikat Awal
95	22	
100	12	
105	10	
110	4	
115	3	
120	2	
125	1	
130	0	← Waktu Ikat Akhir

b) FAS 0,35

Waktu	Penetrasi (mm)	
5	41	
10	41	
15	41	
20	38	
25	35	
30	33	
35	32	
40	32	
45	31	
50	31	
55	31	
60	31	
65	31	
70	30	
75	30	
80	27	
85	25	← Waktu Ikat Awal
90	13	
95	7	
100	5	
105	3	
110	1	
115	1	
120	0	← Waktu Ikat Akhir

2. *Fly Ash*

a) FAS 0,3

Waktu	Penetrasi (mm)
15	41
30	41
45	41
60	41
75	41
90	41
105	41
120	39
135	38
150	35
165	35
180	34
195	33
210	32
220	31
230	27
232	25
237	23
242	15
247	11
252	8
257	5
262	2
267	0

← Waktu Ikat Awal

← Waktu Ikat Akhir

b) FAS 0,35

Waktu	Penetrasi (mm)
15	42
30	42
45	42

Waktu	Penetrasi (mm)	
60	42	
75	37	
90	37	
105	36	
120	34	
135	32	
150	30	
155	29	
160	26	
165	25	← Waktu Ikat Awal
170	19	
175	15	
180	9	
185	7	
190	7	
195	7	
200	5	
205	4	
210	3	
215	3	
220	2	
225	2	
230	1	
235	1	
240	1	
245	1	
250	0	← Waktu Ikat Akhir

Halaman sengaja dikosongkan

Lampiran C

Validasi Hasil Pengujian Material di Laboratorium Limbah PPNS

Halaman sengaja dikosongkan

Hasil Uji di Laboratorium Pengolahan Limbah

Nama : Septiadi Brilian Erlangga

NRP : 1022040033

Tanggal Uji : 11 Februari 2026

A. Analisis Ayakan Pasir Lumajang

Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Berat Lolos (gram)	Jumlah Persentase (%)			
			Tertahan	Lolos	Lolos Kumulatif	Tertahan Kumulatif
A	B	C	D	E	F	G
4,75	3,00	997,00	0,30	100,00	99,70	0,30
2,30	64,67	932,00	6,47	93,00	93,23	6,77
1,18	163,33	769,00	16,33	77,00	76,90	23,10
0,60	215,33	554,00	21,53	55,00	55,37	44,63
0,30	275,67	278,00	27,57	28,00	27,80	72,20
0,15	215,33	63,00	21,53	6,00	6,27	93,73
PAN	62,67	0,00	6,27			100,00
Total	1000,00					
Fine Modulus (FM)	2,41					

B. Analisis Ayakan Limbah GFRP

Ayakan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Berat Lolos (gram)	Jumlah Persentase (%)			
			Tertahan	Lolos	Lolos Kumulatif	Tertahan Akumulatif
4,75	12,67	237,33	94,93	5,07	94,93	5,07
2,30	36,00	214,00	85,60	9,33	85,60	14,40
1,18	78,67	171,33	68,53	17,07	68,53	31,47
0,60	144,67	105,33	42,13	26,40	42,13	57,87
0,30	189,00	61,00	24,40	17,73	24,40	75,60
0,15	221,33	28,67	11,47	12,93	11,47	88,53
PAN	0,00	0,00	0,00	11,47		100,00
Total	250,00					
Fine Modulus (FM)	2,73					

C. Densitas Fly Ash PLTU Paiton

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	100	100	100	100,000
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	60,666	60,666	60,666	60,666
Berat Labu + Kerosin (Penuh) (gram)	139,161	139,161	139,161	139,161
Berat Labu + Fly Ash (gram)	130,666	130,666	130,326	130,553
Berat Labu + Fly Ash + Kerosin (gram)	185,572	185,716	185,225	185,504
Massa Fly Ash (gram)	70,00	70,00	69,66	69,89
Massa Kerosin (Kapasitas Penuh) (gram)	78,50	78,50	78,50	78,50
Kerapatan Kerosin (g/ml)	0,78	0,78	0,78	0,78
Massa Kerosin Sisa (Bersama Fly Ash)	54,91	55,05	54,90	54,95

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Volume Kerosin Sisa (ml)	69,95	70,13	69,94	70,01
Volume Fly Ash Aktual (ml)	30,05	29,87	30,06	29,99
Kerapatan (Densitas) Fly Ash (g/cm ³)	2,33	2,34	2,32	2,33

D. Densitas Semen PCC

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	100	100	100	100,000
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	60,825	60,825	60,825	60,830
Berat Labu + Kerosin (Penuh) (gram)	139,225	139,161	140,261	139,550
Berat Labu + Semen (gram)	110,796	110,346	110,033	110,390
Berat Labu + Semen + Kerosin (gram)	175,970	175,9	175,97	175,950
Massa Semen (gram)	49,97	49,52	49,21	49,57
Massa Kerosin (Kapasitas Penuh) (gram)	78,40	78,34	*79,44	78,72
Kerapatan Kerosin (g/ml)	0,78	0,78	0,79	0,79
Massa Kerosin Sisa (Bersama Semen)	65,17	65,55	65,94	65,56
Volume Kerosin Sisa (ml)	83,13	83,68	83,01	83,27
Volume Semen Aktual (ml)	16,87	16,32	16,99	16,73
Kerapatan (Densitas) Semen (g/cm³)	2,96	3,03	2,90	2,96

E. Waktu Ikut Semen PCC dan *Fly Ash*

Binder	Faktor Air Semen	Waktu Ikut (menit)		Waktu Ikut (menit)*	
		Awal	Akhir	Awal	Akhir
100% Semen	0,3	87	130	Min. 45	Maks. 375
	0,35	85	120		
70% Semen, 30% <i>Fly Ash</i>	0,3	232	267		
	0,35	165	250		

Keterangan : Mengacu pada SNI 03-6827-2002

F. Densitas Pasir dan Penyerapan Air Lumajang

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	100,0	100,0	100,0	100,00
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	147,0	147,0	147,0	147,00
Berat Labu + air (Penuh) (gram)	642,0	642,0	642,0	642,00
Massa pasir kering oven	496,0	489,0	489,0	491,33
Berat Labu + Pasir + Air (gram)	956,0	941,0	954,0	950,33
Massa Pasir SSD (gram)	500,0	500,0	500,0	500,00
Berat jenis curah kering (Sd) (g/cm ³)	2,67	2,43	2,60	2,56
Berat jenis curah jenuh kering permukaan (Ss) (g/cm ³)	2,75	2,63	2,82	2,73
Berat jenis semu (Sa) (g/cm ³)	2,73	2,57	2,76	2,68
Penyerapan air (Sw) (%)	0,81	2,25	2,25	1,76

G. Kadar Lumpur Pasir Lumajang

Parameter	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Berat Kering Oven (gram)	300,871	318,922	305,93	308,57
Berat Kering Oven Setelah Pencucian (gram)	285,819	303,841	293,46	294,37
Total Kadar Lumpur (gram)	15,052	15,081	12,47	14,20
Presentase Kadar Lumpur	5,00%	4,73%	4,08%	4,60%

Keterangan : Kadar lumpur pasir harus <5% (PBI,1971)

H. Densitas dan Penyerapan Air Limbah GFRP

Parameter Pengujian	Sampel			Rata - Rata
	I	II	III	
Volume Nominal Labu Ukur (ml)	500,0	500,0	500,0	500,00
Berat Labu Kosong (Kering) (gram)	158,0	158,0	158,0	158,00
Berat Labu + air (Penuh) (gram)	692,0	692,0	692,0	692,00
Massa FRP kering oven	202,0	216,0	217,0	211,67
Berat Labu + FRP + Air (gram)	702,0	707,0	709,0	706,00
Massa FRP SSD (gram)	233,0	233,0	233,0	233,00
Berat jenis curah kering (Sd) (g/cm ³)	0,91	0,99	1,00	0,97
Berat jenis curah jenuh kering permukaan (Ss) (g/cm ³)	1,21	1,16	1,17	1,18
Berat jenis semu (Sa) (g/cm ³)	1,05	1,07	1,09	1,07
Penyerapan air (Sw) (%)	15,35	7,87	7,37	10,08

Surabaya, 22 Juni 2026

Mengetahui,

Kepala Laboratorium Pengolahan
Limbah


Vivin Setiani, S.T., M.Eng. f
NIP 198909162015042002

Lampiran D
Perhitungan *Mix Design* Bata Beton

Halaman sengaja dikosongkan

Perhitungan *mix design* bata beton berukuran 30 x 15 x 10 cm dengan volume cetakan 0,0045 m³ dan menggunakan perbandingan pasir semen 1:6, hasil perhitungan *mix design* disajikan pada berikut.

Kode Benda Uji	Perbandingan Komposisi (kg)				SP (ml)	Air Rata-Rata (kg)
	Binder		Agregat			
	Semen	<i>Fly Ash</i>	Pasir	Limbah GFRP		
BFF00	1,40	0,00	8,79	0,0	7,35	0,44
BFF02	1,40	0,00	8,22	0,21	7,35	0,44
BFF05	1,40	0,00	8,01	0,42	7,35	0,44
BFF075	1,40	0,00	7,80	0,63	7,35	0,44
BFF32	0,98	0,42	8,22	0,21	7,35	0,44
BFF35	0,98	0,42	8,01	0,42	7,35	0,44
BFF375	0,98	0,42	7,80	0,63	7,35	0,44

Perhitungan tersebut diperoleh dari hasil contoh perhitungan berikut untuk mengetahui kebutuhan material untuk membuat 1 buah benda uji.

a) Variasi BFF00 (variasi kontrol)

$$\begin{aligned}
 \text{Densitas direncanakan (ASTM C55)} &= 1900 \text{ kg/m}^3 \\
 \text{Faktor Air Semen (FAS)} &= 0,31 \\
 \text{Densitas } \textit{Superplasticizer} &= 1,05 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Dimensi cetakan bata beton} &= 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \\
 &= 4500 \text{ cm}^3 \\
 &= 0,0045 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa bata beton} &= 1900 \text{ kg/m}^3 \times 0,0045 \text{ m}^3 \\
 &= 8,55 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Safety Factor (+15\%)} &= 8,55 \text{ kg} + (8,55 \text{ kg} \times 15\%) \\
 &= 9,83 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Semen} &= \frac{1}{7} \times 9,83 \text{ kg} \\
 &= 1,4 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Pasir} &= \frac{6}{7} \times 9,83 \text{ kg} \\
 &= 8,79 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\text{Superplasticizer} = 0,5\% \times 1,4 \text{ kg}$$

$$= (0,007 \text{ kg} \times 1000 \text{ g}) \times 1,05 \text{ g/cm}^3$$

$$= 7,35 \text{ cm}^3$$

$$\text{Kebutuhan air} = 0,31 \times 1,4 \text{ kg}$$

$$= 0,44 \text{ kg}$$

b) Variasi BFF02 (variasi dengan 2,5% limbah GFRP)

$$\text{Densitas direncanakan (ASTM C55)} = 1900 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Faktor Air Semen (FAS)} = 0,31$$

$$\text{Densitas } \textit{Superplasticizer} = 1,05 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Dimensi cetakan bata beton} = 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$$

$$= 4500 \text{ cm}^3$$

$$= 0,0045 \text{ m}^3$$

$$\text{Massa bata beton} = 1900 \text{ kg/m}^3 \times 0,0045 \text{ m}^3$$

$$= 8,55 \text{ kg}$$

$$\text{Safety Factor (+15\%)} = 8,55 \text{ kg} + (8,55 \text{ kg} \times 15\%)$$

$$= 9,83 \text{ kg}$$

$$\text{Semen} = \frac{1}{7} \times 9,83 \text{ kg}$$

$$= \text{kg}$$

$$\text{Fly ash} = \frac{0}{7} \times 9,83 \text{ kg}$$

$$= 0 \text{ kg}$$

$$\text{Pasir} = \frac{5,85}{7} \times 9,83 \text{ kg}$$

$$= 8,22 \text{ kg}$$

$$\text{Limbah GFRP} = \frac{0,15}{7} \times 9,83 \text{ kg}$$

$$= 0,21 \text{ kg}$$

$$\text{Superplasticizer} = 0,5\% \times 1,4 \text{ kg}$$

$$= (0,007 \text{ kg} \times 1000 \text{ g}) \times 1,05 \text{ g/cm}^3$$

$$= 7,35 \text{ cm}^3$$

$$\text{Kebutuhan air} = 0,31 \times 1,4 \text{ kg}$$

$$= 0,44 \text{ kg}$$

c) Variasi BFF32 (variasi dengan 2,5% limbah GFRP dan 30% fly ash)

Densitas direncanakan (ASTM C55)	= 1900 kg/m ³
Faktor Air Semen (FAS)	= 0,31
Densitas <i>Superplasticizer</i>	= 1,05 g/cm ³
Dimensi cetakan bata beton	= 30 cm x 15 cm x 10 cm
	= 4500 cm ³
	= 0,0045 m ³

Massa bata beton	= 1900 kg/m ³ x 0,0045 m ³
	= 8,55 kg

<i>Safety Factor</i> (+15%)	= 8,55 kg + (8,55 kg x 15%)
	= 9,83 kg

Semen	= $\frac{0,7}{7}$ x 9,83 kg
	= 0,98 kg

<i>Fly ash</i>	= $\frac{0,3}{7}$ x 9,83 kg
	= 0,42 kg

Pasir	= $\frac{5,85}{7}$ x 9,83 kg
	= 8,22 kg

Limbah GFRP	= $\frac{0,15}{7}$ x 9,83 kg
	= 0,21 kg

<i>Superplasticizer</i>	= 0,5% x 1,4 kg
	= (0,007 kg x 1000 g) x 1,05 g/cm ³
	= 7,35 cm ³

Kebutuhan air	= 0.31 x 1,4 kg
	= 0,44 kg

Halaman sengaja dikosongkan

Lampiran E
Hasil Pengujian XRF Limbah

Halaman sengaja dikosongkan



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI MALANG (UM)
UPT LABORATORIUM TERPADU

Jalan Semarang 5, Malang 65145
email: integratedlab@um.ac.id
Laman: www.integratedlab.um.ac.id

Customers		: Septiadi Brilian Erlangga - PPNS									
Contact Customer		: +62 857-8430-3644									
Email		: wiwik.pratiwi@ppns.ac.id									
Test Equipment		: ED-XRF									
Received Date		: 7 th April 2026									
Order Number		: LTUM.P.271.2026									
OPERATOR, ANALYZER & SUPERVISOR											
Analyzer		: Sutandyo Dwija Laksmiana, S. Pd., M.Si.									
Supervisor		: Prof. Hadi Nur, Ph.D.									
SAMPLE CODE											
<table><tr><th>No</th><th>Nama Sampel</th><th>Description</th><th>Sample Code</th></tr><tr><td>1</td><td>Limbah Fiberglass</td><td>XRF</td><td>RF054</td></tr></table>				No	Nama Sampel	Description	Sample Code	1	Limbah Fiberglass	XRF	RF054
No	Nama Sampel	Description	Sample Code								
1	Limbah Fiberglass	XRF	RF054								
- The results of the analysis are only valid for the samples tested											

Malang, 13th April 2026
Menyetujui,
a.n Lab Terpadu UM
Kepala UPT Lab Terpadu UM

Prof. Hadi Nur, Ph.D.
NIP. 202108196905061003



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
 UNIVERSITAS NEGERI MALANG (UM)
UPT LABORATORIUM TERPADU
 Jalan Semarang 5, Malang 65145
 email: integratedlab@um.ac.id
 Laman: www.integratedlab.um.ac.id

LAPORAN HASIL UJI					
LTUM.LHU.RF.271.2026					
SPECIMEN DESCRIPTION					
Condition of Samples		: White powder			
Sample Code		: RF054			
Material Name		: Limbah Fiberglass			
Measurement time		: 10 th April 2026			
OPERATOR, ANALYZER & SUPERVISOR					
Analyzer		: Sutandyo Dwija Laksmiana, S. Pd., M.Si.			
Supervisor		: Prof. Hadi Nur, Ph.D.			
RESULTS					
Remark:					
Element			Oxide		
Atom	Percentage (%)	Raw data	Oxide	Percentage (%)	Raw data
Si	26.30	Click here 	SiO ₂	38.05	Click here
S	0.89		SO ₃	1.78	
Cl	0.90		Cl	0.54	
K	1.27		K ₂ O	0.85	
Ca	40.65		Al ₂ O ₃	9.81	
Al	7.42		MgO	11.37	
Mg	11.44		PbO	0.08	
Pb	0.15		SrO	0.13	
Zn	0.14		Rb ₂ O	0.05	
Fe	7.62		ZnO	0.08	
Mn	0.17		Fe ₂ O ₃	5.02	
Cr	0.13		MnO	0.10	
Ti	1.62		Cr ₂ O ₃	0.08	
Sc	0.23		V ₂ O ₅	0.04	
Other	1.1		TiO ₂	1.27	
			Sc ₂ O ₃	0.14	
			CaO	30.24	
		Other	0.4		
- The results of the analysis are only valid for the samples tested					

Malang, 13th April 2026
 Menyetujui,
 a.n Lab Terpadu UM
 Kepala UPT Lab Terpadu UM

Prof. Hadi Nur, Ph.D.
 NIP. 202108196905061003

XRF Fly ash Paiton

Preliminary Report of Analysis

Report No : SCI-FABA-009
 Customer : PT. POMI
 Date of Sampling (User) : 02-Des-25
 Date of Receive : 03/12/2025
 Date of Analysis : 04/12/2025
 Ref No :
 Standard Method : ASTM
 PIC CCR P3 : SAIFUL
 PIC MCR P7 : JIWO
 PIC MCR P8 : HOFI

Sample Code				FLY ASH P3 + P7	FLY ASH P 8	BOTTOM ASH P3	BOTTOM ASH P7	BOTTOM ASH P8
				02 Des 2025	02 Des 2025	02 Des 2025	02 Des 2025	14 02 Des 2025
Analysis	Standard Method	Unit	Basis	Result	Result	Result	Result	Result
LOI	ASTM D7348-13	%	AR	0.33	0.30	0.40	2.40	2.22
SO ₃	ASTM D5016-16	%	DB	1.28	1.21	0.141	0.350	0.349
SiO ₂	ASTM D3682-21	%	DB	48.93	47.96	53.45	50.2	49.73
Al ₂ O ₃	ASTM D3682-21	%	DB	23.34	23.76	19.59	17.9	18.74
Fe ₂ O ₃	ASTM D3682-21	%	DB	9.02	8.9	13.13	12.58	11.66
CaO	ASTM D3682-21	%		7.02	7.7	5.3	7.91	8.49
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ +CaO	ASTM D3682-21	%	DB	89.59	89.53	91.61	88.94	88.97
Unburned Carbon	ASTM D6316-17	%	AR	0.315	0.286	0.375	1.93	1.96
Moisture Content	ASTM D3173M-17a	%	-	0.02	0.02	17.25	21.82	27.32
Fines +75 micron	ASTM D4749-87 (R2019)e1	%	-	5.28	6.32	98.35	96.35	98.48
Fines -75 micron	ASTM D4749-87 (R2019)e1	%	-	94.72	93.68	1.65	3.65	1.52

Note :

This report is issued without prejudice. Our liability is limited to the exercise of due care and diligence. This report is not intended to relieve the buyers and sellers from their contractual obligations and only reflects our findings at the time, place and date of attendance only.
 All services are rendered in accordance with Bureau Veritas Commodities Division General Conditions of Service, available on request at https://www.bureauveritas.com/terms_and_conditions

Lampiran F

Hasil Pengujian Densitas, Daya Serap Air, dan Kuat Tekan Bata Beton

Halaman sengaja dikosongkan

Pengujian Densitas dan Daya Serap Air

Hasil Pengujian Di Laboratorium Pengolahan Limbah PPNS

Penyerapan Air dan Densitas Bata Beton

Tanggal Uji : 10 Juni 2026

NO.	Kode Sampel	Berat dalam Air (Kg)	Berat SSD (Kg)	Berat Kering Oven (Kg)	Daya Serap Air (%)	Berat Jenis (Kg/m ³)	Daya Serap Air Rata-Rata (%)	Berat Jenis rata-Rata (Kg/m ³)
		A	B	C	$D = \frac{(B-C)}{C} \times 100$	$E = \frac{C}{(B-A)} \times 1000$	F	G
1	BFF00-1	5,05	9,36	8,87	5,55	2054,18		
2	BFF00-2	5,05	9,48	8,68	9,22	1956,07		
3	BFF00-3	5,05	9,36	8,76	6,92	2028,02	6,55	2044,25
4	BFF00-4	5,10	9,26	8,74	5,93	2101,71		
5	BFF00-5	5,09	9,37	8,91	5,12	2081,29		
6	BFF02-1	4,80	9,05	8,25	9,67	1939,81		
7	BFF02-2	4,71	8,88	8,05	10,35	1926,76		
8	BFF02-3	4,88	9,16	8,35	9,69	1949,11	9,67	1953,94
9	BFF02-4	4,87	9,14	8,32	9,92	1947,54		
10	BFF02-5	4,91	9,07	8,34	8,72	2006,50		
11	BFF05-1	4,43	8,61	7,95	8,35	1897,83		
12	BFF05-2	4,25	8,51	7,70	10,52	1805,39		
13	BFF05-3	4,25	8,40	7,50	11,95	1806,79	11,61	1824,13
14	BFF05-4	4,34	8,23	7,36	11,75	1894,47		
15	BFF05-5	4,04	8,14	7,05	15,50	1716,16		
16	BFF075-1	3,81	7,84	6,78	15,56	1682,38		
17	BFF075-2	3,94	8,00	6,90	15,87	1699,51		
18	BFF075-3	3,91	7,89	6,90	14,28	1733,67	15,87	1711,87
19	BFF075-4	3,98	7,96	6,80	16,99	1711,41		
20	BFF075-5	4,03	7,98	6,84	16,67	1732,38		
21	BFF32-1	4,67	8,97	8,15	10,07	1894,19	9,65	1930,78

NO.	Kode Sampel	Berat dalam Air (Kg)		Berat SSD (Kg)	Berat Kering Oven (Kg)	Daya Serap Air (%)	Berat Jenis (Kg/m ³)	Daya Serap Air Rata-Rata (%)	Berat Jenis rata-Rata (Kg/m ³)	
		A	B		C	$D = ((B-C)/C) \times 100$	$E = (C/(B-A)) \times 1000$		F	G
22	BFF32-2	4,60	8,82	8,04	7,91	9,71	1904,03			
23	BFF32-3	4,60	8,70	7,93	7,72	9,72	1932,93			
24	BFF32-4	4,55	8,56	7,82	7,82	9,47	1950,50			
25	BFF32-5	4,51	8,42	7,71	7,71	9,28	1972,27			
26	BFF35-1	4,74	8,20	7,12	7,12	15,18	1984,93			
27	BFF35-2	4,42	7,67	6,88	6,88	11,41	1802,16			
28	BFF35-3	4,37	8,17	7,37	7,37	10,86	1821,43	12,50		1819,85
29	BFF35-4	4,14	7,97	7,37	7,37	8,10	1724,26			
30	BFF35-5	4,22	7,98	7,21	7,21	10,66	1766,48			
31	BFF375-1	4,03	8,39	7,25	7,25	15,73	1708,28			
32	BFF375-2	3,98	8,59	7,52	7,52	14,24	1864,50			
33	BFF375-3	3,95	8,43	7,40	7,40	13,93	1748,99	13,76		1774,88
34	BFF375-4	3,95	8,51	7,54	7,54	12,87	1834,08			
35	BFF375-5	3,78	8,53	7,61	7,61	12,02	1718,54			

Surabaya, 22 Juni 2026

Mengetahui,

Kepala Laboratorium Pengolahan Limbah


 Vivin Sedjani, S.T., M.Eng.
 NIP198909162015042002

Hasil Pengujian Kuat Tekan



LABORATORIUM BETON, MATERIAL MAJU DAN KOMPUTASI MEKANIK

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
KAMPUS ITS KEPUTIH SUKOLILO SURABAYA 60111
TELP. 5931223, 5994251-55 PES. 1147, 5947284
FAX. (031) 5927650

HASIL PEMERIKSAAN BATAKO

No. 001.26.05 / LB.BETON / 2026.

Dikirim oleh : SEPTIADI BRILIAN ERLANGGA
Tanggal kirim : 26 Mei 2026
Untuk Pekerjaan : Tugas Akhir
Contoh : Batako sebanyak 10 (sepuluh) buah.

No.	Kode	Berat Kg	Tekan Hancur Kg	Tegangan Hancur Netto Kg/cm ²	Tegangan Hancur Bruto Kg/cm ²	Keterangan
1	BFF00	9.09	38400	205.90	130.17	Panjang = 29.5 cm
2	BFF00	9.31	37700	202.14	127.80	Lebar = 10.0 cm
3	BFF00	9.46	41800	224.13	141.69	Tebal = 15.0 cm
4	BFF00	9.17	33600	180.16	113.90	
5	BFF00	9.32	49100	263.27	166.44	Lobang = 1.0
6	BFF02	8.39	18900	99.73	63.05	Panjang lobang = 29.5 cm
7	BFF02	8.25	19200	102.95	65.08	Lebar lobang = 3.5 cm
8	BFF02	8.52	25800	138.34	87.46	
9	BFF02	8.70	30900	165.68	104.75	Luas Brutto = 295.0 cm ²
10	BFF02	8.57	20900	112.06	70.85	Luas Lobang = 103.3 cm ²
						Luas Netto = 186.5 cm ²
			Rata-rata =	169.44	107.12	Luas cekungan tepi = 5.25 cm ²

Catatan :

1. Pengelesan menurut SNI 03 - 0349 - 1989
2. Hasil uji tersebut diatas berdasarkan contoh yang diterima

Surabaya, 26 Mei 2026.
Kepala

Dr. Chandra Irawan, S.T., M.T.
NIP. 19490823 201504 1 001



LABORATORIUM BETON, MATERIAL MAJU DAN KOMPUTASI MEKANIK

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
KAMPUS ITS KEPUTIH SUKOLILO SURABAYA 60111
TELP. 5931223, 5994251-55 PES. 1147, 5947284
FAX. (031) 5927650

HASIL PEMERIKSAAN BATAKO

No. 004.02.06 / L.BETON / 2026.

Dikirim oleh : SEPTIADI BRILIAN ERLANGGA
Tanggal kirim : 02 Juni 2026
Untuk Pekerjaan : Tugas Akhir
Contoh : Batako sebanyak 5 (lima) buah.

No.	Kode	Berat Kg	Tekan Hancur Kg	Tegangan Hancur Netto Kg/cm ²	Tegangan Hancur Bruto Kg/cm ²	Keterangan
1	BFF05	7.98	19615.00	105.17	66.49	Panjang = 29.5 cm
2	BFF05	7.80	14565.00	78.10	49.37	Lebar = 10.0 cm
3	BFF05	8.30	26146.00	140.19	86.63	Tebal = 15.0 cm
4	BFF05	7.98	18535.11	99.38	62.63	
5	BFF05	8.07	18089.97	97.00	61.32	Lobang = 1.0
						Panjang lobang = 29.5 cm
			Rata-rata =	103.97	66.73	Lebar lobang = 3.5 cm
						Luas Brutto = 295.0 cm ²
						Luas Lobang = 103.3 cm ²
						Luas Netto = 196.5 cm ²
						Luas cekungan tepi = 5.25 cm ²

Catatan :

1. Pengelasan menurut SNI 03 - 0349 - 1989
2. Hasil uji tersebut diatas berdasarkan contoh yang diterima

Surabaya, 01 Juni 2026,
Kepala,

Dr. Sandra Irawan, S.T., M.T.
NIP. 19900523 201904 1 001



LABORATORIUM BETON, MATERIAL MAJU DAN KOMPUTASI MEKANIK

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
KAMPUS ITS KEPUTIH SUKOLILO SURABAYA 60111
TELP. 5931223, 5994251-55 PES. 1147, 5947284
FAX. (031) 5927650

HASIL PEMERIKSAAN BATAKO

No. 003.09.06 / L.BETON / 2026

Dikirim oleh : SEPTIADI BRILIAN ERLANGGA
Tanggal kirim : 09 Juni 2026
Untuk Pekerjaan : Tugas Akhir
Contoh : Batako sebanyak 20 (dua puluh) buah.

No.	Kode	Berat Kg	Tekan Hancur Kg	Tegangan Hancur Netto Kg/cm ²	Tegangan Hancur Bruto Kg/cm ²	Keterangan
1	BFF 075	7.15	7900.00	42.36	26.78	Panjang = 29.5 cm
2	BFF 075	7.36	10950.00	58.18	36.78	Lebar = 10.0 cm
3	BFF 075	7.45	8750.00	46.92	29.66	Tebal = 15.0 cm
4	BFF 075	7.59	12600.00	67.56	42.71	
5	BFF 075	7.21	8600.00	46.11	29.15	Lobang = 1.0
6	BFF 32	8.42	27650.00	148.26	93.73	Panjang lobang = 29.5 cm
7	BFF 32	8.17	19800.00	106.17	67.12	Lebar lobang = 3.5 cm
8	BFF 32	8.17	20750.00	111.26	70.34	
9	BFF 32	8.26	20750.00	111.26	70.34	Luas Brutto = 295.0 cm ²
10	BFF 32	8.75	31600.00	169.44	107.12	Luas Lobang = 103.3 cm ²
11	BFF 35	7.75	5200.00	27.88	17.63	Luas Netto = 186.5 cm ²
12	BFF 35	7.98	10290.00	54.96	34.75	
13	BFF 35	8.09	14850.00	78.62	50.34	Luas cekungan tepi = 5.25 cm ²
14	BFF 35	8.00	14200.00	76.14	48.14	
15	BFF 35	7.77	7800.00	41.62	26.44	
16	BFF 375	7.33	8500.00	45.98	28.81	
17	BFF 375	7.49	8450.00	45.31	28.64	
18	BFF 375	7.38	8400.00	45.04	28.47	
19	BFF 375	7.92	12300.00	65.95	41.69	
20	BFF 375	7.56	8100.00	43.43	27.46	
		Rata-rata =		71.66	46.31	

Catatan :

1. Pengujian menurut SNI 03 - 0349 - 1989
2. Hasil uji tersebut diatas berdasarkan contoh yang diterima



Perhitungan Kuat Tekan

NO.	Kode Sampel	Luas Brutto (cm ²)	Luas Lobang (cm ²)	Luas Netto (cm ²)	Tekanan Hancur	Kuat Tekan (kg/cm ²)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (kg/cm ²)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)	Kelas Mutu
		A	B	C = B - A	D	E = D/A	G = F/10,197	H	I	K
1	BFF00-1	300	103,3	196,70	38400,00	128,00	12,55	133,73	13,11	I
2	BFF00-2	300	103,3	196,70	37700,00	125,67	12,32			
3	BFF00-3	300	103,3	196,70	41800,00	139,33	13,66			
4	BFF00-4	300	103,3	196,70	33600,00	112,00	10,98			
5	BFF00-5	300	103,3	196,70	49100,00	163,67	16,05			
6	BFF02-1	300	103,3	196,70	18600,00	62,00	6,08	76,93	7,54	I
7	BFF02-2	300	103,3	196,70	19200,00	64,00	6,28			
8	BFF02-3	300	103,3	196,70	25800,00	86,00	8,43			
9	BFF02-4	300	103,3	196,70	30900,00	103,00	10,10			
10	BFF02-5	300	103,3	196,70	20900,00	69,67	6,83			
11	BFF05-1	300	103,3	196,70	19615,00	65,38	6,41	64,63	6,34	II
12	BFF05-2	300	103,3	196,70	14565,00	48,55	4,76			
13	BFF05-3	300	103,3	196,70	26146,00	87,15	8,55			
14	BFF05-4	300	103,3	196,70	18535,11	61,78	6,06			
15	BFF05-5	300	103,3	196,70	18089,97	60,30	5,91			
16	BFF075-1	300	103,3	196,70	7900,00	26,33	2,58	32,47	3,18	IV
17	BFF075-2	300	103,3	196,70	10850,00	36,17	3,55			
18	BFF075-3	300	103,3	196,70	8750,00	29,17	2,86			
19	BFF075-4	300	103,3	196,70	12600,00	42,00	4,12			
20	BFF075-5	300	103,3	196,70	8600,00	28,67	2,81			
21	BFF32-1	300	103,3	196,70	27650,00	92,17	9,04	80,37	7,88	I

NO.	Kode Sampel	Luas Brutto (cm ²)	Luas Lobang (cm ²)	Luas Netto (cm ²)	Tekanan Hancur	Kuat Tekan (kg/cm ²)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (kg/cm ²)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)	Kelas Mutu
		A	B	C = B - A	D	E = D/A	G = F/10,197	H	I	
22	BFF32-2	300	103,3	196,70	19800,00	66,00	6,47			
23	BFF32-3	300	103,3	196,70	20750,00	69,17	6,78			
24	BFF32-4	300	103,3	196,70	20750,00	69,17	6,78			
25	BFF32-5	300	103,3	196,70	31600,00	105,33	10,33			
26	BFF35-1	300	103,3	196,70	5200,00	17,33	1,70	34,87	3,42	IV
27	BFF35-2	300	103,3	196,70	10250,00	34,17	3,35			
28	BFF35-3	300	103,3	196,70	14850,00	49,50	4,85			
29	BFF35-4	300	103,3	196,70	14200,00	47,33	4,64			
30	BFF35-5	300	103,3	196,70	7800,00	26,00	2,55			
31	BFF375-1	300	103,3	196,70	8500,00	28,33	2,78	30,50	2,99	IV
32	BFF375-2	300	103,3	196,70	8450,00	28,17	2,76			
33	BFF375-3	300	103,3	196,70	8400,00	28,00	2,75			
34	BFF375-4	300	103,3	196,70	12300,00	41,00	4,02			
35	BFF375-5	300	103,3	196,70	8100,00	27,00	2,65			

Keterangan: Berdasarkan SNI 03-0349-1989 mutu bata beton berdasarkan kuat tekan rata-rata yaitu 70 Kg/cm² (mutu I), 50 Kg/cm² (mutu II), 35 Kg/cm² (mutu III), dan 20 Kg/cm² (mutu IV).

Contoh perhitungan :

BFF00-1

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan} &= \frac{P}{A} \\ (\text{Kg/cm}^2) &= \frac{38.400 \text{ Kg}}{300 \text{ cm}^2} \\ &= 128,00 \text{ Kg/cm}^2 \\ &= \frac{128,00}{10,197} \\ &= 12,80 \text{ MPa}\end{aligned}$$

BFF00-2

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan} &= \frac{P}{A} \\ (\text{Kg/cm}^2) &= \frac{37700,00 \text{ Kg}}{300 \text{ cm}^2} \\ &= 66 \text{ Kg/cm}^2 \\ &= \frac{66}{10,197} \\ &= 6,6 \text{ MPa}\end{aligned}$$

BFF00-3

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan} &= \frac{P}{A} \\ (\text{Kg/cm}^2) &= \frac{41.800 \text{ Kg}}{300 \text{ cm}^2} \\ &= 139,33 \text{ Kg/cm}^2 \\ &= \frac{139,33}{10,197} \\ &= 13,66 \text{ MPa}\end{aligned}$$

BFF00-4

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan} &= \frac{P}{A} \\ (\text{Kg/cm}^2) &= \frac{33.600 \text{ Kg}}{300 \text{ cm}^2} \\ &= 112 \text{ Kg/cm}^2 \\ &= \frac{112}{10,197} \\ &= 10,98 \text{ MPa}\end{aligned}$$

BFF00-5

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan} &= \frac{P}{A} \\ (\text{Kg/cm}^2) &= \frac{33.600 \text{ Kg}}{300 \text{ cm}^2} \\ &= 163,67 \text{ Kg/cm}^2 \\ &= \frac{163,67}{10,197} \\ &= 16,05 \text{ MPa}\end{aligned}$$

BFF00-Rata-Rata

$$\begin{aligned}\text{Kuat Tekan Rata-Rata} &= \frac{P1 + P2 + P3 + P4 + p5}{5} \\ (\text{Kg/cm}^2) &= \frac{38.400 \text{ Kg} + 37.700 \text{ Kg} + 41.800 \text{ Kg} + 33.600 \text{ Kg} + 49.100 \text{ Kg}}{300 \text{ cm}^2} \\ &= 133,73 \text{ Kg/cm}^2 \\ &= \frac{133,73}{10,197} \\ &= 13,37 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Halaman sengaja dikosongkan

Lampiran G
Hasil Pengujian TCLP Produk

Halaman sengaja dikosongkan

SUMMARY OF TEST RESULT

Job No. : GL-04357/VI/2026
 Customer : D4 T. PENGOLAHAN LIMBAH - PPNS
 Quotation/PO No. : QUO.062026.3396

Laboratory Sample ID : GL-04357-5
 Customer Sample ID : BFF375
 Date Sampled : 12-Jun-26
 Time Sampled : 11:00
 Sample Matrix : Soil
 Coordinated : *

No.	Test Item	Unit	Test Method	Result	RL	Standard Limit ^{1#}	Standard Limit ^{1##}
1	Lead, Pb	mg/L	SNI 6989-82-2018	0.0115	0.009	3	0.5
2	Zinc, Zn	mg/L	SNI 6989-82-2018	0.12	0.009	300	50
3	Chloride, Cl	mg/L	SNI 6989.19-2009	31.8	2.2	75,000	12,500

Remarks :

RL = Reporting limit, quantitation limit of analyte in sample

¹SL = Standard limit, regulatory limit or threshold value

= Refer to PPRI No. 22/2021 Attachment XIII (TCLP-A)

= Refer to PPRI No. 22/2021 Attachment XIII (TCLP-B)

NA = Not Applicable

* = Subcontracting

** = Not Accredited

Bold = Result exceeding the standard limit

(x,x) = (,) As character indicate thousands notation

(x,x) = (,) As character indicate decimal notation

Note : The test results related from sampling process to testing

PT. Genau Loka Gantari
 Technical Manager

Dian Nur Kuncoro, S. Si

Halaman sengaja dikosongkan

Lampiran H
Hasil Pengujian Statistika

Halaman sengaja dikosongkan

Deskripsi Statistik

Descriptive Statistics

	Variasi	Mean	Std. Deviation	N
Penyerapan Air	BFF00	6.5480	1.63517	5
	BFF02	9.6700	.59745	5
	BFF05	11.6140	2.60206	5
	BFF075	15.8740	1.06284	5
	BFF32	9.6500	.29757	5
	BFF35	13.7580	1.41066	5
	BFF375	11.2420	2.54425	5
	Total	11.1937	3.22064	35
Densitas	BFF00	2044.2538	56.59212	5
	BFF02	1953.9431	30.67904	5
	BFF05	1824.1287	75.31080	5
	BFF075	1711.8688	21.89901	5
	BFF32	1930.7820	32.28625	5
	BFF35	1819.8511	99.44069	5
	BFF375	1774.8788	70.38376	5
	Total	1865.6723	121.62547	35
Kuat Tekan	BFF00	133.7340	19.35041	5
	BFF02	76.9340	17.35445	5
	BFF05	64.6320	14.08147	5
	BFF075	32.4680	6.47187	5
	BFF32	80.3680	17.46152	5
	BFF35	34.8660	13.74870	5
	BFF375	30.5000	5.89253	5
	Total	64.7860	37.20959	35

Hasil Uji Normalitas

Tests of Normality							
	Variasi	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Penyerapan Air	BFF00	.247	5	.200 [*]	.873	5	.279
	BFF02	.300	5	.161	.916	5	.505
	BFF05	.249	5	.200 [*]	.959	5	.804
	BFF075	.184	5	.200 [*]	.947	5	.719
	BFF32	.207	5	.200 [*]	.968	5	.859
	BFF35	.166	5	.200 [*]	.982	5	.947
	BFF375	.274	5	.200 [*]	.922	5	.545
Densitas	BFF00	.187	5	.200 [*]	.939	5	.656
	BFF02	.363	5	.030	.811	5	.099
	BFF05	.225	5	.200 [*]	.892	5	.366
	BFF075	.225	5	.200 [*]	.920	5	.533
	BFF32	.196	5	.200 [*]	.955	5	.775
	BFF35	.294	5	.183	.880	5	.307
	BFF375	.243	5	.200 [*]	.875	5	.289
Kuat Tekan	BFF00	.217	5	.200 [*]	.946	5	.708
	BFF02	.262	5	.200 [*]	.880	5	.309
	BFF05	.279	5	.200 [*]	.911	5	.474
	BFF075	.295	5	.179	.892	5	.367
	BFF32	.339	5	.061	.823	5	.124
	BFF35	.218	5	.200 [*]	.931	5	.602
	BFF375	.444	5	.002	.634	5	.002

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Hasil Uji Homogenitas

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Penyerapan Air	Based on Mean	1.484	6	28	.220
	Based on Median	1.144	6	28	.364
	Based on Median and with adjusted df	1.144	6	14.488	.387
	Based on trimmed mean	1.472	6	28	.224
Densitas	Based on Mean	1.790	6	28	.137
	Based on Median	1.052	6	28	.414
	Based on Median and with adjusted df	1.052	6	14.542	.433
	Based on trimmed mean	1.740	6	28	.149
Kuat Tekan	Based on Mean	1.807	6	28	.134
	Based on Median	.684	6	28	.664
	Based on Median and with adjusted df	.684	6	18.675	.665
	Based on trimmed mean	1.739	6	28	.149

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Design: Intercept + Variasi

Hasil Uji Manova

Multivariate Tests^a

Effect		Value	F	Hypothesis df	Error df	Sig.
Intercept	Pillai's Trace	.999	14694.710 ^b	3.000	26.000	.000
	Wilks' Lambda	.001	14694.710 ^b	3.000	26.000	.000
	Hotelling's Trace	1695.544	14694.710 ^b	3.000	26.000	.000
	Roy's Largest Root	1695.544	14694.710 ^b	3.000	26.000	.000
Variasi	Pillai's Trace	1.546	4.961	18.000	84.000	.000
	Wilks' Lambda	.037	9.128	18.000	74.024	.000
	Hotelling's Trace	12.663	17.353	18.000	74.000	.000
	Roy's Largest Root	11.707	54.632 ^c	6.000	28.000	.000

a. Design: Intercept + Variasi

b. Exact statistic

c. The statistic is an upper bound on F that yields a lower bound on the significance level.

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	Penyerapan Air	274.735 ^a	6	45.789	16.452	.000
	Densitas	398234.118 ^b	6	66372.353	17.747	.000
	Kuat Tekan	41297.062 ^c	6	6882.844	33.355	.000
Intercept	Penyerapan Air	4385.473	1	4385.473	1575.661	.000
	Densitas	121825662.6	1	121825662.6	32573.853	.000
	Kuat Tekan	146902.903	1	146902.903	711.916	.000
Variasi	Penyerapan Air	274.735	6	45.789	16.452	.000
	Densitas	398234.118	6	66372.353	17.747	.000
	Kuat Tekan	41297.062	6	6882.844	33.355	.000
Error	Penyerapan Air	77.931	28	2.783		
	Densitas	104719.528	28	3739.983		
	Kuat Tekan	5777.764	28	206.349		
Total	Penyerapan Air	4738.140	35			
	Densitas	122328616.2	35			
	Kuat Tekan	193977.729	35			
Corrected Total	Penyerapan Air	352.666	34			
	Densitas	502953.646	34			
	Kuat Tekan	47074.826	34			

a. R Squared = .779 (Adjusted R Squared = .732)

b. R Squared = .792 (Adjusted R Squared = .747)

c. R Squared = .877 (Adjusted R Squared = .851)