

TESIS
PERILAKU MEKANIK DAN DURABILITAS
FEROSEMEN DAN FEROGEPOLIMER
MENGGUNAKAN MATERIAL LOKAL DI
KALIMANTAN SELATAN

MARIAMAH



REKAYASA STRUKTUR
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT
2023

TESIS
PERILAKU MEKANIK DAN DURABILITAS
FEROSEMEN DAN FEROGEPOLIMER
MENGGUNAKAN MATERIAL LOKAL DI
KALIMANTAN SELATAN

Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Magister dari
Universitas Lambung Mangkurat

Oleh
MARIAMAH
2120828320005



REKAYASA STRUKTUR
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT
2023

**LEMBAR PENGESAHAN
TESIS PROGRAM STUDI S2-TEKNIK SIPIL**

**Perilaku Mekanik dan Durabilitas Ferosemen dan Ferogeopolimer
Menggunakan Material Lokal di Kalimantan Selatan**

oleh

Mariamah (2120828320005)

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji pada 03/06/2023 dan dinyatakan

LULUS

Komite Penguji :

Ketua : Ir. Ida Barkiah, M.T.
NIP 196911101993032001

Anggota 1 : Ade Yuniati Pratiwi, S.T., M.Sc, Ph.D.
NIP 199003062022032010

Anggota 2 : Darmansyah Tjitradi, S.T., M.T.
NIP 197503192000031001

Pembimbing Utama : Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M.Eng.
NIP 197907232005012005

Pembimbing Pendamping : Ir. Ratni Nurwidayati, M.T., M.Eng.Sc.
NIP 196901061995022001

Ida Barkiah

Ade Yuniati Pratiwi

Darmansyah Tjitradi

Dr. Nursiah Chairunnisa

Ir. Ratni Nurwidayati

Banjarbaru, 21 JUN 2023

diketahui dan disahkan oleh:

**Wakil Dekan Bidang Akademik
Fakultas Teknik ULM,**

Dr. Mahmud, S.T., M.T.
NIP 197401071998021001

**Koordinator Program Studi
S-2 Teknik Sipil,**

Dr. Eng. Irfan Prasetya, S.T., M.T.
NIP 198510262008121001



Irfan Prasetya

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis ini merupakan penelitian yang telah saya lakukan. Segala kutipan dari berbagai sumber telah di ungkapkan sebagaimana mestinya. Tesis ini belum pernah dipublikasikan untuk keperluan lain oleh siapapun juga.

Jika di kemudian hari ternyata pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia menerima hukuman dari ketidak benaran pernyataan tersebut.

Banjarmasin, Juni 2023

Yang Membuat Pernyataan,



MARIAMAH

2120828320005

ABSTRAK

PERILAKU MEKANIK DAN DURABILITAS FEROSEMEN DAN FEROGEPOLIMER MENGGUNAKAN MATERIAL LOKAL DI KALIMANTAN SELATAN

Mariamah
2120828320005

Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M. Eng
Ir. Ratni Nurwidayati, M.T., M.Eng. Sc

Produksi semen membutuhkan pembakaran bahan bakar fosil dalam jumlah besar dan penguraian batu kapur, yang menghasilkan emisi karbondioksida (CO₂) yang signifikan ke atmosfer. Salah satu upaya untuk mengurangi 100% penggunaan semen dan memanfaatkan limbah fly ash adalah mortar geopolimer yang diaplikasikan pada pelat tipis yang disebut fero geopolimer. Resistensi klorida penting untuk daya tahan geopolimer yang digunakan dalam aplikasi konstruksi, khususnya di daerah lahan gambut dan daerah yang memiliki potensi pasang surut air laut.

Penelitian ini bertujuan mengetahui kuat tekan mortar geopolimer, kuat lentur pelat fero geopolimer dan evaluasi durabilitas. Mortar semen dan pelat ferosemen dibuat sebagai kontrol. Tulangan polos diameter 6 mm digunakan sebagai tulangan utama dan dilapisi dengan kawat loket PVC hijau pada bagian atas dan bawah. Metode perawatan benda uji sampai 28 hari sebelum terekspose lingkungan menggunakan metode lembab. Setelah masa perawatan, benda uji diekspose pada lingkungan menggunakan tiga metode yaitu terendam terus-menerus pada air rawa (*wet*), siklus *wet-dry* pada air rawa dan air PDAM. Perencanaan campuran mortar geopolimer berdasarkan perbandingan berat dengan tambahan *superplasticizer plastiment-VZ* 0,3% dari berat fly ash.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mortar geopolimer mengalami persentase peningkatan kuat tekan pada air rawa (*wet*) dan air PDAM (*wet-dry*) berturut-turut sebesar 21,52% dan 0,72% terhadap kuat tekan sebelum terekspose lingkungan. Namun mengalami penurunan kuat tekan pada air rawa (*wet-dry*) sebesar 5,27%. Lingkungan lebih signifikan berpengaruh pada kuat tekan mortar semen dan kuat lentur ferosemen dibandingkan dengan mortar geopolimer dan fero geopolimer. Pelat fero geopolimer mengalami persentase penurunan kuat lentur yang lebih rendah dibandingkan pelat ferosemen pada lingkungan pada metode air rawa (*wet*), air rawa (*wet-dry*) dan air PDAM (*wet-dry*) berturut-turut sebesar 31,84%, 35,60% dan 14,37% terhadap kuat lentur sebelum terekspose lingkungan. Sedangkan pada ferosemen terjadi penurunan berturut-turut sebesar 57,17%, 41,32% dan 26,40%. Hasil absorpsi porositas dan *sorptivity* mortar semen lebih baik dibandingkan mortar geopolimer.

Kata Kunci: *Durabilitas, Fly Ash, Ferosemen, Fero geopolimer*

ABSTRACT

MECHANICAL BEHAVIOR AND DURABILITY OF FERROCEMENTS AND FERRO-GEOPOLYMERS USING LOCAL MATERIALS IN KALIMANTAN SELATAN

Mariamah
2120828320005

Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M. Eng
Ir. Ratni Nurwidayati, M.T., M.Eng. Sc

Cement production requires burning large amounts of fossil fuels and decomposing limestone, which results in significant carbon dioxide (CO₂) emissions into the atmosphere. One of the efforts to reduce 100% of cement use and utilize fly ash waste is geopolymer mortar which is applied to thin plates called ferro-geopolymer. Chloride resistance is important for the durability of geopolymers used in construction applications, particularly in peatland areas and areas with the potential for sea tides.

This study aims to determine the compressive strength of geopolymer mortar, and the flexural strength of ferro-geopolymer plates and evaluate its durability. Cement mortar and ferrocement plates served as controls. Plain reinforcement of 6 mm diameter was used as the main reinforcement and covered with green PVC counter wire on the top and bottom. The method of treating test specimens up to 28 days before being exposed to the environment using the moist method. After the curing period, the specimens were exposed to the environment using three methods, namely continuous immersion in swamp water (wet), wet-dry cycle in swamp water and PDAM water. Planning of mixed geopolymer mortar based on weight ratio with the addition of superplasticizer plastiment-VZ 0.3% by weight of fly ash.

The results showed that geopolymer mortar experienced a percentage increase in compressive strength in swamp water (wet) and PDAM water (wet-dry) respectively by 21.52% and 0.72% of the compressive strength before being exposed to the environment. However, the compressive strength decreased in swamp water (wet-dry) by 5.27%. The environment has a more significant effect on the compressive strength of cement mortar and the flexural strength of ferrocement compared to geopolymer and ferro-geopolymer mortar. The ferro-geopolymer plate experienced a lower percentage decrease in flexural strength than the ferrocement plate in the swamp water (wet), swamp water (wet-dry), and PDAM water (wet-dry) methods respectively 31.84%, 35.60 %, and 14.37% of flexural strength before exposure to the environment. While in ferrocement there was a successive decrease of 57.17%, 41.32%, and 26.40%. The results of absorption porosity and sorptivity of cement mortar were better than those of geopolymer mortar.

Keywords: *Durability, Fly Ash, Ferrocement, Ferro-Geopolymer*

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini yang berjudul “Durabilas dan Perilaku Mekanik Ferosemen dan Ferogeopolimer Menggunakan Fly Ash PLTU Asam-Asam di Kalimantan Selatan”. Penyusunan tesis ini bertujuan untuk memenuhi persyaratan mencapai derajat Magister S2 pada Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat.

Selama penyusunan laporan Tesis ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak yang telah memberikan kontribusi baik berupa bantuan maupun dukung, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua saya, Babah Kamuruddin dan Mama Rohani atas doa, dukungan, semangat, kasih sayang dan segala yang diperlukan hingga saya dapat menyelesaikan gelar magister ini.
2. Ibu Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M.Eng. dan Ibu Ir. Ratni Nurwidayati, M.T., M.Eng.Sc., selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam memberikan arahan dan penjelasan kepada penulis sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Ibu Ir. Ida Barkiah, M.T., IPU, Ibu Ade Yuniati Pratiwi, S.T., M.T., Ph.D dan Bapak Ir. Darmansyah Tjitradi S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan tesis ini.
4. Bapak Dr. Eng. Irfan Prasetia, S.T., M.T selaku Koordinator Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat.
5. Segenap dosen Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat yang telah banyak memberikan ilmu kepada kami.
6. Kedua kakak saya Mariana dan Mariani, juga adik adik saya Mujibuddin dan Mahira yang selalu memberikan semangat, dukungan dan motivasi dalam menyelesaikan tesis ini.
7. Bapak Muhammad Nurrul Kahfi selaku Pejabat Pelaksana Lingkungan PLN UPK Asam-asam yang memberi bantuan material fly ash Asam-asam.

8. Para instruktur Laboratorium Struktur dan Material Universitas Lambung Mangkurat dan juga mahasiswa magang yang telah banyak membantu saya dalam pembuatan tesis ini.

Akhir kata, saya menyadari penyusunan tesis ini tidak luput dari kekurangan, oleh karena itu diharapkan kritik dan saran yang membangun agar tesis ini lebih baik lagi. Saya berharap tesis dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
PRAKATA.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR PERSAMAAN.....	xxii
DAFTAR SINGKATAN	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Beton Pracetak.....	7
2.2 Geopolimer.....	8
2.2.1 Proses Sintesis.....	9
2.2.2 Mekanisme Geopolimerisasi.....	13
2.2.3 Sifat Geopolimer	14
2.3 Faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Mortar dan Beton Geopolimer .	16
2.3.1 Molaritas Larutan	16

2.3.2	Rasio Larutan Alkali	17
2.3.3	Rasio Fly Ash terhadap Larutan Alkali	18
2.3.4	Tipe Fly Ash.....	19
2.4	Ferosemen	21
2.4.1	Potensi Ferosemen di Indonesia.....	23
2.4.2	Aplikasi Ferosemen di Indonesia.....	23
2.4.3	Perbedaan Ferosemen dan Beton Bertulang	25
2.5	Ferogeopolimer	31
2.6	Material Penyusun Ferosemen dan Ferogeopolimer	34
2.6.1	Semen.....	34
2.6.2	Air	38
2.6.3	Agregat Halus.....	38
2.6.4	Fly Ash.....	39
2.6.5	Larutan Alkali	46
2.6.6	Tulangan.....	48
2.6.7	Bahan Tambah (<i>Admixture</i>).....	52
2.7	Durabilitas	55
2.8	Daktilitas	60
2.9	Perawatan Benda Uji (<i>Curing</i>).....	61
2.10	Pengujian Terhadap Benda Uji.....	64
2.9.1	Pengujian Absorpsi dan Porositas.....	64
2.9.2	Pengujian <i>Sorptivity</i>	65
2.9.3	Pengujian Karbonasi	67
2.9.4	Pengujian Kuat Tekan	70
2.9.6	Pengujian Kuat Lentur	72
BAB III METODE PENELITIAN		75
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	75
3.2	Waktu dan Tempat	77

3.3	Persiapan dan Pengujian Bahan Dasar	77
3.3.1	Alat.....	77
3.3.2	Bahan.....	81
3.3.3	Pengujian Bahan Dasar	85
3.4	Rancangan Penelitian	86
3.5	Pembuatan Benda Uji.....	90
3.5.1	Persiapan Material.....	90
3.5.2	Benda Uji Ferosemen.....	93
3.5.3	Benda Uji Ferogeopolimer.....	95
3.6	Perawatan Benda Uji	102
3.7	Pengujian Benda Uji.....	103
3.7.1	Pengujian Absorpsi dan Porositas.....	103
3.7.2	Pengujian <i>Sorptivity</i>	105
3.7.3	Pengujian Kuat Tekan	107
3.7.4	Pengujian Kuat Lentur	108
3.7.5	Pengujian Karbonasi	110
3.8	Analisis dan Penarikan Kesimpulan.....	110
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		111
4.1	Pemeriksaan Karakteristik Material	111
4.1.1	Pemeriksaan Agregat Halus	111
4.1.2	Pemeriksaan Fly Ash	112
4.1.3	Pemeriksaan Semen	113
4.1.4	Pemeriksaan Waktu Pengikatan.....	113
4.2	<i>Sorptivity</i>	115
4.3	Absorpsi dan Porositas	117
4.4	Kuat Tekan Mortar	118
4.4.1	Kuat Tekan Mortar Semen.....	119
4.4.2	Kuat Tekan Mortar Geopolimer.....	125

4.5	Pengaruh Lingkungan terhadap Kuat Tekan Mortar	131
4.5.1	Pengaruh Lingkungan terhadap Kuat Tekan Mortar Semen.....	131
4.5.2	Pengaruh Lingkungan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer.	132
4.5.3	Perbandingan Pengaruh Lingkungan Mortar Semen dan Mortar Geopolimer pada Air Rawa (<i>wet</i>)	134
4.5.4	Perbandingan Pengaruh Lingkungan Mortar Semen dan Mortar Geopolimer pada Air Rawa (<i>wet-dry</i>).....	135
4.5.5	Perbandingan Pengaruh Lingkungan Mortar Semen dan Mortar Geopolimer pada Air PDAM (<i>wet-dry</i>)	136
4.5.6	Gabungan Kuat Tekan Mortar Semen dan Mortar Geopolimer....	137
4.6	Kuat Lentur Pelat.....	138
4.6.1	Kuat Lentur Pelat Ferosemen.....	146
4.6.2	Kuat Lentur Pelat Feroeopolimer.....	152
4.7	Pola Retak Pengujian Kuat Lentur Ferosemen dan Feroeopolimer ...	159
4.8	Pengaruh Lingkungan terhadap Kuat Lentur Pelat	161
4.8.1	Pengaruh Lingkungan terhadap Kuat Lentur Pelat Ferosemen.....	161
4.8.2	Pengaruh Lingkungan terhadap Kuat Lentur Pelat Feroeopolimer	162
4.8.3	Perbandingan Pengaruh Lingkungan Pelat Ferosemen dan Pelat Feroeopolimer pada Air Rawa (<i>wet</i>).....	163
4.8.4	Perbandingan Pengaruh Lingkungan Pelat Ferosemen dan Pelat Feroeopolimer pada Air Rawa (<i>wet-dry</i>)	165
4.8.5	Perbandingan Pengaruh Lingkungan Pelat Ferosemen dan Pelat Feroeopolimer pada Air PDAM (<i>wet-dry</i>).....	166
4.8.6	Gabungan Kuat Lentur Pelat Ferosemen dan Pelat Feroeopolimer	167
4.9	Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Lentur Ferosemen dan Feroeopolimer	168
4.10	Hubungan Beban dan Lendutan	169

4.10.1	Hubungan Beban dan Lendutan Pelat Ferosemen	169
4.10.2	Hubungan Beban dan Lendutan Pelat Feroeopolimer	171
4.11	Hasil Uji Karbonasi	174
4.12	Rekapitulasi Hasil Penelitian.....	179
BAB V PENUTUP		180
5.1	Kesimpulan.....	180
5.2	Saran	180
DAFTAR RUJUKAN		181
LAMPIRAN.....		197

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Hasil Penelitian Terdahulu Mengenai Geopolimer	19
Tabel II.2 Sifat penulangan dan Komposisi Bahan Fero semen (Djausal, 2004) ..	28
Tabel II.3 Hasil Penelitian Terdahulu Mengenai Fero semen.....	30
Tabel II.4 Hasil Penelitian Terdahulu Mengenai Fero geopolimer.....	33
Tabel II.5 Komposisi Semen Portland (Nawy, 1998).....	36
Tabel II.6 Karakteristik Kimia Semen Portland (SNI 2049-2015)	36
Tabel II.7 Karakteristik Fisik Semen Portland (SNI 2049-2015)	37
Tabel II.8 Gradasi Pasir (Tjokrodinuljo, 2007)	38
Tabel II.9 Persyaratan Kandungan Kimia Fly Ash (ASTM International, 2010) .	40
Tabel II.10 Persyaratan Fisik Fly Ash (ASTM International, 2010)	41
Tabel II.11 Kandungan Kimia Fly Ash PLTU Asam-Asam.....	42
Tabel II.12 Komposisi Na_2SiO_3	47
Tabel II.13 Karakteristik dan Rekomendasi Pemakaian <i>Plastiment-VZ</i> (Product Data Sheet Plastiment VZ, 2018).....	54
Tabel II.14 Komposisi HCL 32%	64
Tabel III.1 Variabel dan Nomenklatur Benda Uji Pelat Fero semen	88
Tabel III.2 Variabel dan Nomenklatur Benda Uji Pelat Fero geopolimer	88
Tabel III.3 Variabel dan Nomenklatur Benda Uji Kubus Mortar Semen	89
Tabel III.4 Variabel dan Nomenklatur Benda Uji Kubus Mortar Geopolimer	89
Tabel IV.1 Hasil Pemeriksaan Agregat Halus	111
Tabel IV.2 Hasil Pemeriksaan Fly Ash.....	112
Tabel IV.3 Hasil Pemeriksaan Semen.....	113
Tabel IV.4 Hasil Pemeriksaan Waktu Pengikatan Awal dan Akhir	113
Tabel IV.5 Hasil Pengujian <i>Sorptivity</i> Mortar Semen	115
Tabel IV.6 Hasil Pengujian <i>Sorptivity</i> Mortar Geopolimer	116
Tabel IV.7 Hasil Pengujian Absorpsi dan Porositas	118
Tabel IV.8 Kuat Tekan Mortar Semen MS-A.....	120
Tabel IV.9 Kuat Tekan Mortar Semen MS-B.....	122
Tabel IV.10 Kuat Tekan Mortar Semen MS-C.....	124
Tabel IV.11 Kuat Tekan Mortar Geopolimer MG-A.....	126

Tabel IV.12 Kuat Tekan Mortar Geopolimer MG-B	128
Tabel IV.13 Kuat Tekan Mortar Geopolimer MG-C	130
Tabel IV.14 Prediksi Beban Maksimum Pelat	142
Tabel IV.15 Kuat Lentur Pelat Ferosemen FS-A	147
Tabel IV.16 Kuat Lentur Pelat Ferosemen FS-B	149
Tabel IV.17 Kuat Lentur Pelat Ferosemen FS-C	151
Tabel IV.18 Kuat Lentur Pelat Ferogeopolimer FG-A	153
Tabel IV.19 Kuat Lentur Pelat Ferogeopolimer FG-B	155
Tabel IV.20 Kuat Lentur Pelat Ferogeopolimer FG-C	157
Tabel IV.21 Pola Retak Benda Uji Ferosemen	159
Tabel IV.22 Pola Retak Benda Uji Ferogeopolimer	160
Tabel IV.23 Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Lentur Ferosemen	168
Tabel IV.24 Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Lentur Ferogeopolimer	168
Tabel IV.25 Beban Lendutan Pelat Ferosemen.....	170
Tabel IV.26 Nilai Daktilitas Pelat Ferosemen	171
Tabel IV.27 Beban Lendutan Pelat Ferogeopolimer.....	172
Tabel IV.28 Nilai Daktilitas Pelat Ferogeopolimer	173
Tabel IV.29 Rekapitulasi Hasil Penelitian	179

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Ikatan Polimerisasi SiO ₄ dan AlO ₄ (Geopolymer Institute, 2006)....	9
Gambar II.2 Macam Ikatan Polimerisasi Berdasarkan Perbandingan Si dan Al (Davidovits, 1994)	9
Gambar II.3 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dari Fase Awal Pembentukan	10
Gambar II.4 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dari Beton Geopolimer Umur 28 Hari (Škvára et al., 2006)	10
Gambar II.5 Ikatan Polimerisasi yang Terjadi pada Beton Geopolimer (Geopolymer Institute, 2006)	10
Gambar II.6 Ikatan yang Terjadi pada Beton Konvensional (Kiri) dan Ikatan yang Terjadi pada Beton Geopolymer (Kanan) (Geopolymer Institute, 2006)	11
Gambar II.7 Pengaruh Si/Al pada Ikatan Polimer (Geopolymer Institute, 2006). 11	
Gambar II.8 Grafis Molekul Komputer dari Polimer Mn-(-Si-O-Al-O-)n poly(sialate) and Mn-(-Si-O-Al-O-Si-O-)n poly(sialate-siloxo), dan Ikatan Kerangkanya (Davidovits, 1994)	12
Gambar II.9 Model Konseptual Proses Geopolimerisasi (Duxson et al., 2007)... 13	
Gambar II.10 Penggunaan Anyaman Kawat pada Penel Dinding (Dewi et al., 2008)	24
Gambar II.11 Teknologi Ferosemen untuk Jaringan Irigasi Tersier (http://elearning.litbang.pu.go.id/)	25
Gambar II.12 Pengujian Pelat Terlipat dan Pelat Datar (Majeed & Mahmood, 2009)	29
Gambar II.13 Atap Trapesium Ferogeopolimer (Vipin et al., 2021)	31
Gambar II.14 Variasi Layer Wire Mesh (Srikrishna & Rao, 2020).....	32
Gambar II.15 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dari Fly Ash (Hardjito & Rangan, 2005)	41
Gambar II.16. Skema Proses dan Produk Reaksi Pozolanik Abu Terbang (Mujiburrahman, 2019)	43

Gambar II.17 Contoh Perbedaan Jumlah Kandungan Kalsium Hidroksida Semen (Reference) dengan Semen-Abu Terbang (FA35-67W40) berdasarkan Waktu (Baert et al., 2007).....	44
Gambar II.18 Ilustrasi Perbedaan Peningkatan Kuat Tekan Beton dengan Abu Terbang terhadap Beton Normal (Control) berdasarkan Waktu (Thomas, 2007)	44
Gambar II.19 Contoh Pengaruh Peningkatan Penggunaan Abu Terbang terhadap Ekspansi Merusak pada Beton akibat Reaksi Silika-Alkali (Thomas, 2007)	45
Gambar II.20 <i>Ettringite</i> yang Mengkristal Ulang pada Retakan Beton Akibat Reaksi Silika-Alkali (Understanding Cement, 2005).....	45
Gambar II.21 Tulangan Ferosemen (Djausal, 2004).....	48
Gambar II.22 Kawat Jala Segi Enam (Djausal, 2004)	49
Gambar II.23 Kawat Jala Las Segi Empat (Djausal, 2004)	50
Gambar II.24 Kawat Anyaman Las Segi Empat (Djausal, 2004)	50
Gambar II.25 Kawat Jala Bentuk Wajik	51
Gambar II.26 Tulangan Diameter 6 mm	52
Gambar II.27 Kawat Ayam	52
Gambar II.28 Kerusakan Struktur Beton Bertulang (Isgor, 2001).....	56
Gambar II.29 Skema Pengujian <i>Sorptivity</i>	67
Gambar II.30 Warna untuk Menentukan Nilai pH Beton dan Tingkat Karbonasinya (Hulimka & Kafuza, 2020).....	68
Gambar II.31 Uji Karbonasi Beton (Khan et al., 2017)	69
Gambar II.32 Skematis dari Tahapan Karbonasi (Kaddah et al., 2022)	70
Gambar II.33 Cetakan Kubus Benda Uji (SNI 03-6825-2002)	71
Gambar II.34 Skema Pengujian Kuat Tekan Benda Uji Kubus (Prasetyo et al., 2015)	71
Gambar II.35 Pengujian Kuat Lentur.....	72
Gambar II.36 Patah pada 1/3 Bentang Tengah (Persamaan 2.16)	73
Gambar II.37 Patah di Luar 1/3 Bentang Tengah dan Garis Patah pada < 5% dari Bentang (Persamaan 2.17)	73
Gambar II.38 Patah di Luar 1/3 Bentang Tengah dan Garis Patah pada >5% dari Bentang.....	74
Gambar III.1 Diagram Alir Penelitian Ferosemen.....	75

Gambar III.2 Diagram Alir Penelitian Ferogeopolimer	76
Gambar III.3 Molen	77
Gambar III.4 Bekisting Benda Uji Mortar	77
Gambar III.5 Bekisting Benda Uji Pelat	78
Gambar III.6 Timbangan.....	78
Gambar III.7 Gelas Ukur.....	78
Gambar III.8 Alat Pengecoran	78
Gambar III.9 Alat Uji Tekan.....	79
Gambar III.10 <i>Sieve Shaker</i>	79
Gambar III.11 <i>Load Indicator</i>	79
Gambar III.12 <i>Data Logger</i>	79
Gambar III.13 <i>Dial Indicator</i>	80
Gambar III.14 <i>Frame Baja</i>	80
Gambar III.15 <i>Hydraulic Jack</i>	80
Gambar III.16 <i>Load Cell</i>	80
Gambar III.17 Mikroskop Digital	81
Gambar III.18 Oven	81
Gambar III.19 Meja Getar.....	81
Gambar III.20 Fly Ash Asam-Asam	82
Gambar III.21 Pasir Barito.....	82
Gambar III.22 Serpihan Sodium Hidroksida (NaOH)	82
Gambar III.23 Sodium Silikat (Na_2SiO_3).....	83
Gambar III.24 Asam Klorida (HCl).....	84
Gambar III.25 Larutan <i>Phenolphthalein</i>	84
Gambar III.26 <i>Plastiment-VZ</i>	85
Gambar III.27 Pembuatan Larutan NaOH 8M.....	91
Gambar III.28 Tulangan Rangka dan Kawat Locket PVC Hijau	91
Gambar III.29 Gambar Kerja	91
Gambar III.30 Gambar 3D	92
Gambar III.31 Tahu Beton	92
Gambar III.32 Fly Ash Lolos Saringan No. 200.....	92
Gambar III.33 Pencucian Agregat Halus Lolos Saringan No. 4.....	93

Gambar III.34 Persiapan Material Pasir, Semen dan Air.....	94
Gambar III.35 Persiapan Bekisting Mortar dan Pelat Fero semen.....	94
Gambar III.36 Pengadukan Mortar dan Pelat Fero semen.....	94
Gambar III.37 Pengecoran Mortar dan Pelat Fero semen.....	94
Gambar III.38 Perawatan Mortar dan Pelat Fero semen.....	95
Gambar III.39 Komposisi Mortar Geopolimer	95
Gambar III.40 Bekisting Benda Uji Mortar	97
Gambar III.41 Bahan-Bahan Penyusun Mortar Geopolimer	97
Gambar III.42 <i>Mixer</i> Pengaduk.....	98
Gambar III.43 Proses Pencetakan Mortar Geopolimer	98
Gambar III.44 Pelepasan Bekisting Mortar Geopolimer	98
Gambar III.45 Persiapan Material Pasir dan Fly Ash	100
Gambar III.46 Persiapan Larutan Alkali.....	100
Gambar III.47 Persiapan Bekisting Pelat Fero geopolimer	101
Gambar III.48 Pengadukan Pelat Fero geopolimer.....	101
Gambar III.49 Penambahan <i>Plastiment-VZ</i> 0,3%.....	101
Gambar III.50 Pengecoran Pelat Fero geopolimer.....	101
Gambar III.51 Perawatan Pelat Fero geopolimer.....	102
Gambar III.52 Perawatan Mortar dan Pelat Kondisi Lembab.....	102
Gambar III.53 Kondisi Terekspose Lingkungan Air PDAM.....	102
Gambar III.54 Kondisi Terekspose Lingkungan Air Rawa <i>Artificial</i>	103
Gambar III.55 Benda Uji untuk Pengujian Absorpsi dan Porositas.....	104
Gambar III.56 Memasukkan Benda Uji kedalam Oven Suhu 100-110°C.....	104
Gambar III.57 Merendam Benda Uji Selama 48 Jam.....	104
Gambar III.58 Merebus Benda Uji Selama 5 Jam	105
Gambar III.59 Menimbang Benda Uji di dalam Air	105
Gambar III.60 Memasukkan Benda Uji ke dalam Oven Suhu 50°C	105
Gambar III.61 Memasukkan Benda Uji dalam Wadah Penyimpanan	106
Gambar III.62 Benda Uji dilapisi <i>Electrical Tape</i>	106
Gambar III.63 Meletakkan Benda Uji di atas Air	106
Gambar III.64 Menimbang Benda Uji Mortar	107
Gambar III.65 Pengujian Tekan Benda Uji Mortar	107

Gambar III.66 <i>Set-up</i> Alat Pengujian Tekan Kubus Mortar	108
Gambar III.67 <i>Set-Up</i> Alat Pengujian Kuat Lentur Pelat	109
Gambar III.68 Detail A <i>Set-Up</i> Alat Pengujian Kuat Lentur Pelat.....	109
Gambar III.69 Pengujian Kuat Lentur Pelat	109
Gambar III.70 Contoh Hasil Uji Karbonasi	110
Gambar III.71 Pengujian Karbonasi	110
Gambar IV.2 Pemeriksaan Waktu Pengikatan Pasta Semen dan Pasta Geopolimer	114
Gambar IV.3 Waktu Pengikatan Awal dan Akhir	114
Gambar IV.4 Pengujian <i>Sorptivity</i>	115
Gambar IV.5 Penyerapan air kumulatif vs $\sqrt{\text{Waktu}}$	116
Gambar IV.6 <i>Sorptivity</i> vs Waktu.....	117
Gambar IV.7 Pengujian Absorpsi dan Porositas.....	118
Gambar IV.8 Pengujian Kuat Tekan Mortar.....	119
Gambar IV.9 Pengujian Kuat Tekan Mortar Semen MS-A.....	119
Gambar IV.10 Hasil Kuat Tekan Mortar Semen MS-A	120
Gambar IV.11 Pengujian Kuat Tekan Mortar Semen MS-B.....	121
Gambar IV.12 Hasil Kuat Tekan Mortar Semen MS-B.....	122
Gambar IV.13 Pengujian Kuat Tekan Mortar Semen MS-C	123
Gambar IV.14 Hasil Kuat Tekan Mortar Semen MS-C.....	124
Gambar IV.15 Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer MG-A	125
Gambar IV.16 Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer MG-A.....	126
Gambar IV.17 Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer MG-B	127
Gambar IV.18 Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer MG-B.....	128
Gambar IV.19 Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer MG-C	129
Gambar IV.20 Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer MG-C.....	130
Gambar IV.21 Pengaruh Variasi Kondisi Terekspose Lingkungan pada Mortar Semen.....	131
Gambar IV.22 Pengaruh Variasi Kondisi Terekspose Lingkungan pada Mortar Geopolimer.....	132
Gambar IV.23 Pengaruh Kondisi Mortar Terekspose Air Rawa (<i>wet</i>).....	134
Gambar IV.24 Pengaruh Kondisi Mortar Terekspose Air Rawa (<i>wet-dry</i>)	135

Gambar IV.25 Pengaruh Kondisi Mortar Terekspose Air PDAM (<i>wet-dry</i>).....	136
Gambar IV.26 Gabungan Kuat Tekan Mortar Semen dan Mortar Geopolimer .	137
Gambar IV.27 Pengujian Kuat Lentur Pelat	138
Gambar IV.28 Reaksi Perletakan Sederhana	142
Gambar IV.29 Bentang A-C	143
Gambar IV.30 Potongan Bentang C-D	144
Gambar IV.31 Potongan Bentang B-D	144
Gambar IV.32 Diagram Gaya Dalam Akibat Beban Terpusat	144
Gambar IV.33 Diagram Gaya Dalam Akibat Beban Merata	145
Gambar IV.34 Diagram Momen Akibat Beban Kombinasi	145
Gambar IV.35 Pengujian Kuat Lentur Pelat FS-A	147
Gambar IV.36 Kuat Lentur Pelat Ferosemen FS-A	148
Gambar IV.37 Pengujian Kuat Lentur Pelat FS-B.....	149
Gambar IV.38 Kuat Lentur Pelat Ferosemen FS-B	150
Gambar IV.39 Pengujian Kuat Lentur Pelat FS-C.....	151
Gambar IV.40 Kuat Lentur Pelat Ferosemen FS-C	152
Gambar IV.41 Pengujian Kuat Lentur Pelat FG-A.....	153
Gambar IV.42 Kuat Lentur Pelat Ferogeopolimer FG-A	154
Gambar IV.43 Pengujian Kuat Lentur Pelat FG-B	155
Gambar IV.44 Kuat Lentur Pelat Ferogeopolimer FG-B.....	156
Gambar IV.45 Pengujian Kuat Lentur Pelat FG-C	157
Gambar IV.46 Kuat Lentur Pelat Ferogeopolimer FG-C.....	158
Gambar IV.47 Pola Retak Pengujian Kuat Lentur.....	161
Gambar IV.48 Pengaruh Variasi Kondisi Terekspose Lingkungan pada Pelat Ferosemen	161
Gambar IV.49 Pengaruh Variasi Kondisi Terekspose Lingkungan pada Pelat Ferogeopolimer	162
Gambar IV.50 Pengaruh Kondisi Pelat Terekspose Air Rawa (<i>wet</i>).....	164
Gambar IV.51 Pengaruh Kondisi Pelat Terekspose Air Rawa (<i>wet-dry</i>)	165
Gambar IV.52 Pengaruh Kondisi Pelat Terekspose Air PDAM (<i>wet-dry</i>).....	166
Gambar IV.53 Gabungan Kuat Lentur Pelat Ferosemen dan Pelat Ferogeopolimer	167

Gambar IV.54 <i>Setting Up</i> Pelat Sebelum dan Sesudah Pembebanan	169
Gambar IV.55 Hubungan Beban dan Lendutan FS-A	170
Gambar IV.56 Hubungan Beban dan Lendutan FS-B	170
Gambar IV.57 Hubungan Beban dan Lendutan FS-C	171
Gambar IV.58 Hubungan Beban dan Lendutan FG-A.....	172
Gambar IV.59 Hubungan Beban dan Lendutan FG-B.....	172
Gambar IV.60 Hubungan Beban dan Lendutan FG-C.....	173
Gambar IV.61 Perbandingan Lendutan Fero semen dan Fero geopolimer Kontrol	174
Gambar IV.62 Uji Karbonasi Potongan Pelat Fero semen	175
Gambar IV.63 Zona yang Diidentifikasi.....	175
Gambar IV.64 Detail Karbonasi Fero semen dengan Mikroskop Digital USB 500X	176
Gambar IV.65 Uji Karbonasi Potongan Pelat Fero geopolimer	177
Gambar IV.66 Detail Karbonasi Fero geopolimer dengan Mikroskop Digital USB 500X.....	178

DAFTAR PERSAMAAN

Pers. (2.1)	13
Pers. (2.2)	13
Pers. (2.3)	16
Pers. (2.4)	16
Pers. (2.5)	61
Pers. (2.6)	64
Pers. (2.7)	65
Pers. (2.8)	65
Pers. (2.9)	65
Pers. (2.10)	65
Pers. (2.11)	65
Pers. (2.12)	65
Pers. (2.13)	66
Pers. (2.14)	66
Pers. (2.15)	71
Pers. (2.16)	71
Pers. (2.17)	72
Pers. (2.18)	73

DAFTAR SINGKATAN

Mr	= Berat molekul atau molekul relatif (gr/mol)
w _i	= Berat awal sampel kering oven (gr)
w _s	= Berat spesimen jenuh (gr)
w _b	= Berat sampel yang direbus (gr)
w _w	= Berat spesimen dalam air setelah mendidih (gr)
g ₁	= Densitas sampel kering (Mg/m ³)
g ₂	= Densitas semu dari sampel yang direbus (Mg/m ³) dan
ρ	= Densitas air (=1 Mg/m ³ = 1 gr/cm ³)
S	= <i>Sorptivity</i> (mm/mm ^{1/2})
t	= akar waktu hisap (menit)
I	= Penyerapan air kumulatif (gr/mm)
Δm _t	= Perubahan massa benda uji (gr) pada waktu t
a	= Luas permukaan benda uji (mm ²)
d	= Massa jenis air dalam (gr/mm ³)
f' _c	= Kuat tekan beton (MPa atau N/mm ²)
f _b	= Kuat lentur beton (MPa atau N/mm ²)
P	= Gaya tekan aksial (N)
A	= Luas penampang benda uji (mm ²)
Y _m	= Berat isi mortar (kg/cm ³)
B _m	= Berat benda uji (kg)
V	= Volume benda uji (cm ³)
σ _l	= Kuat lentur benda uji (MPa)
P	= Beban tertinggi yang terbaca pada mesin uji (N)
L	= Jarak bentang antara dua garis perletakan (mm)
b	= lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm)
h	= lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)
μ	= Tingkat Daktilitas
δ _u	= Lendutan Ultimit (mm)
δ _y	= Lendutan Leleh (mm)