

DISERTASI

**KARAKTERISTIK STRUKTUR PRACETAK
FEROGEOPOLIMER PADA IRIGASI
DI LINGKUNGAN LAHAN BASAH**

Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor



Oleh:

Ratni Nurwidayati

NIM 2140511320006

**PROGRAM STUDI DOKTOR (S3) ILMU PERTANIAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT
BANJARBARU
2024**

DISERTASI

**KARAKTERISTIK STRUKTUR PRACETAK
FEROGEOPOLIMER PADA IRIGASI
DI LINGKUNGAN LAHAN BASAH**

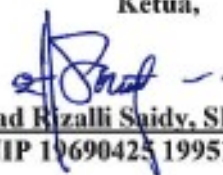
Oleh:

**Ratni Nurwidayati
NIM 2140511320006**

**Dipertahankan di depan penguji
Pada tanggal 4 Juli 2024
Dan dinyatakan memenuhi syarat**

KOMISI PEMBIMBING

Ketua,




**Prof. Akhmad Rizalli Saidy, SP., M.Ag.Sc., Ph. D
NIP 19690425 199512 1 001**

Anggota 1



**Dr. Ir. Henry Wardhana, MT.
19570607 198603 1 002**

Anggota 2



**Dr. Nursiah Chairunnisa, ST., M. Eng.
19790723 200501 2 005**

Banjarbaru, 25 Juli 2024

**Koordinator,
Program Studi Doktor (S3) Ilmu
Pertanian**



**Dr. Ir. Bambang Joko Pritamadi, M.P.
19630505 199003 1 001**

Dekan

Fakultas Pertanian



**Prof. Akhmad Rizalli Saidy, SP., M.Ag.Sc., Ph.D.
NIP 19690425 199512 1 001**

IDENTITAS KOMISI PEMBIMBING DAN KOMISI PENGUJI

JUDUL PROPOSAL DISERTASI:

**KARAKTERISTIK STRUKTUR PRACETAK FEROGEPOLIMER PADA
IRIGASI DI LINGKUNGAN LAHAN BASAH**

Nama : Ratni Nurwidayati
NIM : 2140511320006
Program Studi : Doktor (S3) Ilmu Pertanian

KOMISI PEMBIMBING:

Ketua : Prof. Akhmad Rizalli Saïdy, S.P., M.Ag.Sc., Ph.D.
Anggota 1 : Dr. Ir. Henry Wardhana, M.T.
Anggota 2 : Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M. Eng.

KOMISI PENGUJI:

Penguji 1 : Prof. Ir. H. Fadly H. Yusran, M.Sc., Ph.D., IPU
Penguji 2 : Dr. Rony Riduan, S.T., M.T.
Penguji 3 : Dr. Eng. Irfan Praselia, S.T., M.T.

Tanggal Ujian Disertasi : 4 Juli 2024
SK Komisi Penguji : 61/UN8.4/KP/2022

PERNYATAAN ORISINALITAS PROPOSAL DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam Naskah Disertasi ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Disertasi ini dibatalkan serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70 yang berbunyi : 'Lulusan perguruan tinggi yang karya ilmiahnya digunakan untuk memperoleh gelar akademik, profesi atau vokasi terbukti merupakan jiplakan dicabut gelarnya'. Pasal 70 yang berbunyi : 'Lulusan yang karya ilmiahnya yang digunakannya untuk mendapatkan gelar akademik, profesi atau vokasi sebagaimana yang dimaksud dalam pasal 25 ayat 2 terbukti merupakan jiplakan dipidana dengan pidana penjara paling lama dua tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp. 200.000.000,00 (dua ratus juta rupiah).

Banjarbaru, Juli 2024



Ratni Nurwidayati
NIM 2140511320006

Sertifikat uji plagiasi

*Disertasi ini kupersembahkan kepada
Kedua Orang Tua Tercinta: **Alm Abdul Djebbar Hapip**
dan **Almh Kesuma Sekarsih**
Suami Tercinta **Khairil Fiannor Ansyari**
Anaknda Tercinta **Yuqo Azhari Alifanur**
Kedua Saudaraku **Reny Azimah** dan **Yoyi Farizah***

RIWAYAT HIDUP

Ratni Nurwidayati, Banjarmasin, 6 Januari 1969 anak dari ayah Alm. Prof. Abdul Djebar Hapip, MA dan Ibu Almh. Dra Kesuma Sekarsih. Lulus SDN Jaya pada tahun 1981, SMPN 2 Seroja tahun 1984 dan lulus SMAN 1 tahun 1987. Ketiga jenjang pendidikan ini di Kota Banjarmasin. Studi S1 di Fakultas Teknik Sipil Universitas Lambung Mangkurat melalui jalur seleksi PMDK (Penelurusan Minat dan Kemampuan). Mahasiswa Berprestasi Fakultas Teknik ULM pada tahun 1988. Lulus S1 pada tahun 1992 sebagai lulusan terbaik Fakultas Teknik ULM. Tahun 1995 melanjutkan studi S2 pada program studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan Institut Teknologi Bandung (ITB) lulus tahun 1998. Kemudian pada tahun 2012 lulus dari program Master dari Adelaide University, South Australia. Pengalaman kerja sebagai PNS staf pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat sejak tahun 1995.

Banjarbaru, Juli 2024
Ratni Nurwidayati

RINGKASAN

RATNI NURWIDAYATI, NIM 2140511320006. Karakteristik Struktur Pracetak Ferogeopolimer Untuk Irigasi Di Lingkungan Lahan Basah. Ketua Komisi Pembimbing: Akhmad Rizalli Saidy. Anggota Komisi Pembimbing 1: Henry Wardhana, Anggota Komisi Pembimbing 2: Nursiah Chairunnisa.

Pembangunan infrastruktur menyebabkan meningkatkan kebutuhan terhadap semen dan listrik meningkat. Hal ini menyebabkan terjadinya pemanasan global dan menumpuknya limbah *fly ash* pada PLTU. Geopolimer merupakan salah satu upaya untuk mengurangi penggunaan semen dan menggunakan limbah *fly ash*. Dilain pihak pembangunan saluran irigasi juga meningkat untuk mendukung ketahanan pangan. Kadangkala lokasi irigasi tersier yang jauh dan sulit pembuatan saluran *in situ* menyebabkan sistem pracetak berbentuk panel tipis yang mudah dibawa menjadi solusi. Di lingkungan asam pasang surut, beton kadang terendam dan kadang tidak terendam. Hal ini dapat mempengaruhi sifat mekanik beton. Sebagai material yang baru, perlu evaluasi durabilitas ferogeopolimer di lingkungan asam pasang surut.

Tujuan penelitian ini adalah: 1) membuat rekomendasi komposisi pemakaian *fly ash* Asam-Asam sebagai material dasar geopolimer, 2) mengevaluasi perubahan visual dan kuat tekan mortar geopolimer setelah terekspose lingkungan asam selama tiga bulan, 3) mengevaluasi kuat lentur ferogeopolimer setelah terekspose lingkungan asam.

Metode eksperimental digunakan dalam penelitian ini. Pertama penetapan komposisi optimum mortar geopolimer berdasarkan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari yang akan digunakan pada tahap kedua dan ketiga. Kedua durabilitas mortar geopolimer di lingkungan asam dan ketiga durabilitas ferogeopolimer.

Material dasar adalah *fly ash* limbah PLTU Asam-Asam. Larutan alkali adalah Na_2SiO_3 dan NaOH 8M dengan rasio 1, 1,5, 2 dan 2,5. Plastiment-VZ digunakan sebesar 0,1, 0,2 dan 0,3% dari berat *fly ash*. Rasio *fly ash*/larutan alkali adalah 60/40 dan rasio pasta geopolimer/agregat halus adalah 65/35. Benda uji pasta geopolimer berbentuk silinder diameter 3,8 cm dan tinggi 7,6 cm. Mortar berbentuk kubus dengan sisi 5 cm. *Curing* pasta dan mortar geopolimer dilembabkan. Kuat tekan dievaluasi pada umur 14 dan 28 hari. Pengujian porositas dan *sorptivity* dilakukan pada umur 28 hari. Pengujian durabilitas mortar geopolimer pada komposisi optimum dengan cara merendam mortar pada larutan asam sulfat pH 3 setelah berumur 28 hari. Untuk mengevaluasi pengaruh pasang surut, benda uji direndam tujuh hari (*wet*) kemudian dibiarkan pada suhu ruang tujuh hari (*dry*) sehingga disebut siklus *wet-dry* sampai pada umur pengujian. Lingkungan asam yang lain adalah dengan *full* rendam. Sebagai kontrol, mortar geopolimer direndam di air PDAM. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 1, 2 dan 3 bulan setelah terekspose lingkungan asam. Pengujian durabilitas juga dilakukan terhadap ferogeopolimer berukuran $55 \times 15 \times 3,5 \text{ cm}^3$. Penulangan ferogeopolimer mengikuti Balitbang PUPR dengan modifikasi yaitu tulangan pokok dan pembagi adalah tulangan polos diameter 6 mm, jarak tulangan 10 cm. *Wire mesh* diameter 1,5 mm dan lebar bukaan 10 mm dipasang diatas dan dibawah

tulangan besi. Sebagai kontrol dilakukan pengujian yang sama terhadap mortar semen dan ferosemen.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa makin tinggi rasio alkali dan persentase *admixture* makin lama waktu pengikatan baik awal maupun akhir meskipun tidak signifikan perubahannya. Makin tinggi kuat tekan pasta geopolimer makin tinggi kuat tekan mortar geopolimer. Kuat tekan pasta geopolimer dan mortar geopolimer meningkat dengan meningkatnya umur benda uji, rasio larutan alkali dan meningkatnya persentase *admixture*. Makin tinggi rasio alkali makin tinggi rasio molar $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ yang menyebabkan waktu pengikatan bertambah lama meningkatkan kuat tekan.

Kuat tekan mortar geopolimer terus meningkat sampai dengan tiga bulan terekspose lingkungan *full* asam sedangkan mortar semen mengalami penurunan kuat tekan sampai 44%. Siklus *wet-dry* asam memberikan pengaruh yang berbeda. Kuat tekan mortar geopolimer meningkat hanya dibulan pertama perendaman, selanjutnya mengalami penurunan kuat tekan. Kuat tekan mortar semen mengalami penurunan 28,7% pada bulan ketiga. Pada kondisi lingkungan *full* normal (air PDAM) kedua mortar mengalami kenaikan. Kenaikan kuat tekan mortar geopolimer sangat signifikan dibandingkan dengan mortar semen. Sedangkan pada siklus *wet-dry* air normal, kuat tekan mortar geopolimer terus meningkat sedangkan mortar semen mengalami penurunan terus menerus sampai bulan ketiga yang mencapai 22,69%. Tidak terjadi perubahan visual mortar geopolimer yang signifikan antara *full* dengan siklus *wet-dry* baik pada lingkungan asam maupun normal. Hal ini mungkin disebabkan proses evaluasi yang hanya tiga bulan.

Kuat lentur feroegeopolimer meningkat di bulan pertama setelah terekspose lingkungan *full* asam sedangkan ferosemen mengalami penurunan kuat lentur sejak bulan pertama terus meningkat sampai bulan ketiga. Ketika diberikan ekspose *wet-dry* asam, kuat lentur feroegeopolimer dan ferosemen meningkat namun keduanya mengalami penurunan pada bulan kedua dan ketiga. Pada kondisi *full* normal, feroegeopolimer menunjukkan kuat lentur yang meningkat sedangkan ferosemen mengalami penurunan, walau tidak terlalu signifikan kenaikan atau penurunannya. Ketika terekspose lingkungan *wet-dry* normal, kuat lentur meningkat hanya dibulan pertama setelah itu kuat lentur terus menurun sampai bulan ketiga.

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa mortar geopolimer lebih tahan terhadap lingkungan asam dibanding mortar semen. Feroegeopolimer dan ferosemen yang berbeda hanya mortar pengisi panel pelatnya, karena mortar geopolimer pengisi panel pelat feroegeopolimer maka durabilitas feroegeopolimer lebih tahan jika dibandingkan ferosemen yang pengisinya adalah mortar semen. Sehingga dapat direkomendasikan bahwa pengaplikasian feroegeopolimer dapat dilakukan di lingkungan asam pasang surut.

SUMMARY

RATNI NURWIDAYATI, NIM 2140511320006. Structural Characteristics of Ferrogeopolymer Precast for Wetland Irrigation. Promotor: Akhmad Rizalli Saidy, Co-Promotor 1: Henry Wardhana, Co-Promotor 2: Nursiah Chairunnisa.

Infrastructure development has increased the demand for cement and electricity, causing global warming and the accumulation of fly ash waste in power plants. Geopolymer is one of the efforts to reduce the use of cement and fly ash waste. On the other hand, the construction of irrigation channels has also increased to support food security. Sometimes, the location of tertiary irrigation is far away, and it is challenging to make channels in situ, so precast systems in thin panels that are easy to carry are a solution. In tidal acid environments, concrete is sometimes submerged and sometimes not. The condition can affect the mechanical properties of the concrete. As a new material, it is necessary to evaluate the durability of ferogeopolymer in a tidal acid environment.

The objectives of this study were: 1. To recommend the composition of using Asam-Asam fly ash as a base material for geopolymer. 2. To evaluate geopolymer mortar's visual changes and compressive strength after being exposed to an acid environment for three months. 3. To evaluate the flexural strength of ferogeopolymer after exposure to an acidic environment.

This study employed a rigorous experimental method. The first stage involved determining the optimal composition of geopolymer mortar based on achieving the highest compressive strength at 28 days. This composition was then used in the subsequent stages. The second stage focused on assessing the durability of geopolymer mortar in acidic environments, while the third stage was dedicated to evaluating the durability of ferogeopolymer. Each stage was meticulously designed and executed to ensure the reliability of the findings.

The raw material was fly ash waste from Asam-Asam power plant. Alkaline solutions were Na_2SiO_3 and NaOH 8M with 1, 1.5, 2, and 2.5 ratios. Plastiment-VZ was used at 0.1, 0.2, and 0.3% by weight of fly ash. The fly ash/alkali solution ratio was 60/40, and the geopolymer paste/fine aggregate ratio was 65/35. The geopolymer paste specimens were cylindrical with a diameter of 3.8 cm and a height of 7.6 cm. The mortar was a cube with a side of 5 cm. The geopolymer paste and mortar curing were covered with a wet towel to moisten the specimen. The compressive strength was evaluated at 14 and 28 days. Porosity and sorptivity tests were conducted at 28 days. Durability testing of geopolymer mortar immersing the mortar in sulfuric acid solution pH three after 28 days of age. The specimens were soaked for seven days (wet condition) and then left at room temperature for seven days (dry condition), the so-called wet-dry cycle up to the testing age, to evaluate the effect of tides on mortar durability.

Total immersion in an acidic solution was also conducted. As a control, the geopolymer mortar was soaked in PDAM water. Compressive strength tests were conducted at 1, 2, and 3 months after exposure to an acidic environment. Durability testing was also conducted on $55 \times 15 \times 3.5$ cm³ ferogeopolymer. The reinforcement

of fero-geopolymer follows Balitbang PUPR with modifications. The longitudinal reinforcement and dividers are plain reinforcement with a diameter of 6 mm and a spacing of 10 cm. Wire mesh with a diameter of 1.5 mm and an opening width of 10 mm was installed above and below the reinforcing bars. As a control, the same test was conducted on cement mortar and ferrocement.

The results showed that the higher the alkali ratio and the percentage of admixtures, the longer the setting time, both at the initial and final setting, although the change was insignificant. The higher the compressive strength of geopolymer paste, the higher the compressive strength of geopolymer mortar. The compressive strength of geopolymer paste and mortar increased with the age of test specimens, the alkali solution ratio, and the percentage of admixture. The higher the alkali ratio, the higher the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar ratio, which causes the binding time to increase, increasing the compressive strength.

The compressive strength of geopolymer mortar continued to increase for up to three months when exposed to a whole acid environment, while cement mortar experienced a decrease in compressive strength by up to 44%. The acid wet-dry cycle had a different effect. The compressive strength of geopolymer mortar increased only in the first month of immersion and then decreased. The compressive strength of cement mortar decreased by 28.7% in the third month. Under full normal environmental conditions (PDAM water), both mortars increased. The increase in compressive strength of geopolymer mortar is very significant compared to cement mortar. While in the normal water wet-dry cycle, the compressive strength of geopolymer mortar continued to increase while the cement mortar experienced a continuous decrease until the third month when it reached 22.69%. There was no significant visual change of geopolymer mortar between full and wet-dry cycles in both acidic and normal environments. This may be due to the evaluation process being only three months.

The flexural strength of fero-geopolymer increased in the first month after exposure to a full acid environment. At the same time, ferrocement experienced a decrease in flexural strength from the first month and continued to increase until the third month. When exposed to wet-dry acid, fero-geopolymer and ferrocement's flexural strength increased but decreased in the second and third months. Under full normal conditions, fero-geopolymer increased flexural strength while ferrocement decreased, although the increase or decrease was insignificant. When exposed to a normal wet-dry environment, the flexural strength increased only in the first month, after which the flexural strength continued to decrease until the third month.

Based on the results, geopolymer mortar is more resistant to acidic environments than cement mortar. Fero-geopolymer and ferrocement are different. Only the mortar fills the plate panel because the geopolymer mortar fills the fero-geopolymer plate panel, and the durability of fero-geopolymer is more resistant when compared to ferrocement, whose filler is cement mortar. So, it is recommended that fero-geopolymers be applied in tidal acid environments.

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis sampaikan ke hadirat Allah SWT atas ijin dan perkenan Nya jua lah penulis dapat menyelesaikan disertasi ini Tidak lupa pula salawat dan salam penulis sampaikan ke hadirat Nabi Muhammad SAW atas berkat dan rahmat beliau kepada kami semua.. Disertasi dengan judul “**Karakteristik Struktur Pracetak Ferogeopolimer Pada Irigasi di Lingkungan Lahan Basah**” merupakan salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Doktor dalam Program Studi Ilmu Pertanian Universitas Lambung Mangkurat.

Terima kasih penulis ucapkan untuk kedua orang tua, abah Alm. Prof. Abdul Djebar Hapip, MA dan mama Almh. Dra Kesuma Sekarsih. Suami Drh. Khairil Fiannor Ansyari, anak Yuqo Azhari Alifanur. Kakak Dra. Reny Azimah dan Adik Dr. Yoyi Farizah, M. Kes., atas segala kasih sayang, doa, dukungan moril dan materi selama masa studi ini.

Kepada Komisi Pembimbing Prof. Akhmad Rizalli Saidy, S.P., M.Ag.Sc., Ph.D, Dr. Ir. Henry Wardhana, M.T., dan Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M. Eng. atas segala bimbingan, arahan dan saran yang diberikan sehingga Disertasi ini dapat diselesaikan tepat waktu.

Kepada Komisi Penguji Prof. Ir. H. Fadly H. Yusran, M.Sc., Ph.D., IPU, Dr. Rony Riduan, S.T., M.T. dan Dr. Eng. Irfan Prasetia, S.T., M.T. dan Penguji luar Dr. Ir. Ery Budiman, S.T., M.T., IPM atas segala masukan yang diberikan sejak awal proses penelitian dan penyusunan Disertasi ini.

Terima kasih juga diucapkan pada seluruh pihak yang telah mendukung hingga disertasi dapat diselesaikan. Penulis sadar bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan disertasi ini, namun penulis harap ada manfaat yang bisa diperoleh dari disertasi ini. Demikian disertasi ini penulis sampaikan untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya. Atas perhatiannya penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.

Banjarbaru, Juli 2024

Penulis,

DAFTAR ISI

RINGKASAN	viii
SUMMARY	x
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
DAFTAR ISTILAH	xxiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	6
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Pembatasan Masalah.....	7
1.6 Kebaharuan (<i>Novelty</i>).....	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Lahan Basah	9
2.2 Beton Normal	9
2.3 Beton Geopolimer.....	13
2.4 Bahan Pembentuk Geopolimer.....	15
2.4.1 Material Dasar <i>Fly ash</i>	16
2.4.2 Alkali aktivator	18
2.5 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Beton Geopolimer.....	21
2.5.1 Material Dasar	21
2.5.2 Konsentrasi Larutan NaOH	21
2.5.3 Rasio Berat Natrium Silikat terhadap Natrium Hidroksida	23
2.5.4 Rasio Berat Alkali aktivator terhadap <i>Fly ash</i>	24
2.6 Bahan Tambah.....	25
2.7 <i>Workability</i>	28
2.8 Waktu Pengikatan (<i>Setting Time</i>) Geopolimer.....	30
2.9 Fero semen dan Fero geopolimer	34
2.10 Daya Tahan Beton	40
2.10.1 Ketahanan Terhadap Asam.....	42
2.10.2 Karbonasi.....	46

2.10.3	Faktor-faktor yang Mempengaruhi Daya Tahan Beton Geopolimer.....	47
2.10.4	Material Dasar	48
2.10.5	Larutan Alkali.....	50
2.11	Pracetak	51
2.12	Karakteristik <i>Fly ash</i>	53
2.12.1	Kehalusan <i>Fly ash</i>	53
2.12.2	Berat Volume <i>Fly ash</i>	54
2.13	Sifat Mekanik Geopolimer	55
2.13.1	Kuat Tekan.....	55
2.13.2	Kuat Lentur.....	56
2.14	Densitas, Penyerapan Air dan Porositas	58
2.15	Laju Penyerapan (<i>Sorptivity</i>).....	61
BAB 3 METODE PENELITIAN		64
3.1	Kerangka Penelitian.....	64
3.2	Tempat dan Waktu.....	65
3.3	Penelitian Komposisi Pasta dan Mortar Geopolimer	65
3.3.1	Alat dan Bahan	65
3.3.2	Komposisi Campuran Pasta Geopolimer.....	69
3.3.3	Komposisi Campuran Mortar Geopolimer	69
3.3.4	Langkah-langkah Pelaksanaan.....	70
3.3.5	Metode Pengambilan Data.....	76
3.3.6	Analisis Data.....	85
3.4	Penelitian Durabilitas Mortar Geopolimer dan Mortar Semen	87
3.4.1	Alat dan Bahan	89
3.4.2	Komposisi Campuran Mortar Geopolimer dan Mortar Semen	90
3.4.3	Langkah-langkah Pelaksanaan.....	90
3.4.4	Metode Pengambilan Data.....	91
3.4.5	Analisa Data.....	92
3.5	Penelitian Durabilitas Ferogeopolimer dan Ferosemen.....	95
3.5.1	Alat dan Bahan	95
3.5.2	Langkah-langkah Pelaksanaan.....	96
3.5.3	Metode Pengambilan Data.....	100
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		104
4.1	Penentuan Komposisi Pasta dan Mortar Geopolimer.....	104
4.1.1	Karakteristik Agregat Halus	104
4.1.2	Karakteristik <i>Fly Ash</i>	105
4.1.3	Waktu Pengikatan (<i>Setting Time</i>).....	105
4.1.4	Kuat Tekan Pasta Geopolimer	106
4.1.5	Kuat Tekan Mortar Geopolimer	111
4.1.6	Hubungan Kuat Tekan Pasta dan Mortar Geopolimer	114
4.1.7	Densitas, Penyerapan Air dan Porositas	115
4.1.8	<i>Sorptivity</i>	118
4.2	Durabilitas Mortar Geopolimer	122
4.2.1	Kuat Tekan Mortar Geopolimer	122

4.2.2	Kuat Tekan Mortar Semen.....	124
4.2.3	Pengaruh Lingkungan Terhadap Mortar Geopolimer dan Mortar Semen	126
4.2.4	Perubahan Visual Mortar Semen dan Mortar Geopolimer	130
4.3	Durabilitas Fero geopolimer dan Fero semen.....	136
4.3.1	Kuat Lentur.....	136
4.3.2	Kuat Lentur Fero geopolimer	139
4.3.3	Kuat lentur fero semen.....	141
4.3.4	Pengaruh Lingkungan Terhadap Fero geopolimer dan Fero semen 143	
4.3.5	Pengujian Karbonasi	147
4.4	Implikasi Hasil Penelitian.....	157
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		158
5.1	Kesimpulan.....	158
5.2	Saran	160
DAFTAR PUSTAKA.....		161
LAMPIRAN		174
PUBLIKASI ILMIAH TERKAIT DISERTASI.....		190

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Komposisi semen Portland.....	11
Tabel 2.2.	Batas gradasi agregat kasar	12
Tabel 2.3.	Gradasi agregat halus	12
Tabel 2.4.	Komposisi kimia yang disyaratkan ASTM C618-02.....	17
Tabel 3.1.	Kandungan kimia Na_2SiO_3	68
Tabel 3.2.	Karakteristik dan rekomendasi pemakaian Plastiment-VZ.....	68
Tabel 3.3.	Komposisi campuran pasta dan mortar geopolimer.....	70
Tabel 3.4.	Nomenklatur benda uji pasta geopolimer	85
Tabel 3.5.	Nomenklatur benda uji mortar geopolimer	86
Tabel 3.6.	Komposisi mortar semen.....	90
Tabel 3.7.	Nomenklatur benda uji mortar geopolimer dan mortar semen pada evaluasi durability	94
Tabel 3.8.	Nomenklatur benda uji pelat pracetak fero geopolimer dan fero semen.....	103
Tabel 4.1.	Karakteristik agregat halus.....	104
Tabel 4.2.	Kandungan kimia fly ash.	105
Tabel 4.3.	Kuat tekan pasta geopolimer.....	107
Tabel 4.4.	Kuat tekan mortar geopolimer	112
Tabel 4.5.	Sifat-sifat fisik mortar geopolimer	116
Tabel 4.6.	Sifat-sifat fisik mortar semen	118
Tabel 4.7.	Kuat tekan rata-rata mortar geopolimer setelah terekspose lingkungan.....	122
Tabel 4.8.	Kuat tekan rata-rata mortar semen setelah terekspose lingkungan.....	124

Tabel 4.9.	Perubahan visual mortar geopolimer setelah terekspose lingkungan asam.....	131
Tabel 4.10.	Perubahan visual mortar geopolimer setelah terekspose lingkungan normal	132
Tabel 4.11.	Perubahan visual mortar semen setelah terekspose lingkungan asam.....	133
Tabel 4.12.	Perubahan visual mortar semen setelah terekspose lingkungan normal	135
Tabel 4.13.	Prediksi beban maksimum	139
Tabel 4.14.	Beban maksimum dan kuat lentur fero geopolimer	141
Tabel 4.15.	Beban maksimum dan kuat lentur ferosemen	142
Tabel 4.16.	Karbonasi pada fero geopolimer kondisi full asam.....	149
Tabel 4.17.	Karbonasi pada fero geopolimer kondisi siklus wet-dry asam	150
Tabel 4.18.	Karbonasi pada fero geopolimer kondisi full normal	151
Tabel 4.19.	Karbonasi pada fero geopolimer kondisi siklus wet-dry normal	152
Tabel 4.20.	Karbonasi pada ferosemen kondisi full asam.....	153
Tabel 4.21.	Karbonasi pada ferosemen kondisi <i>siklus wet-dry</i> asam	154
Tabel 4.22.	Karbonasi pada ferosemen kondisi <i>full</i> normal PDAM.....	155
Tabel 4.23.	Karbonasi pada ferosemen kondisi <i>siklus wet-dry</i> normal PDAM.....	156

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Geopolimer.....	14
Gambar 2.2.	Pengaruh jenis superplasticizer terhadap workability (Xie & Kayali, 2016).....	15
Gambar 2.3.	Pengaruh kehalusan partikel fly ash terhadap kuat tekan mortar geopolimer (A. Fernández-Jiménez & Palomo, 2003).....	18
Gambar 2.4.	Pengaruh alkali aktivator terhadap kuat tekan pasta (Palomo et al., 1999).....	19
Gambar 2.5.	Kristalisasi sodium carbonate (Nurwidayati et al., 2016).....	20
Gambar 2.6.	Pengaruh molaritas terhadap kuat tekan pasta geopolimer pada umur 28 hari (Somna et al., 2011).....	22
Gambar 2.7.	Pengaruh molaritas terhadap workability dan waktu pengikatan (Luga & Atis, 2018; Naghizadeh & Ekolu, 2019).....	22
Gambar 2.8.	Pengaruh rasio alkali terhadap kuat tekan beton geopolimer (Hardjito, 2005).....	24
Gambar 2.9.	Pengaruh rasio berat alkali aktivator terhadap (Kamhangrittirong et al., 2011; Wongpa et al., 2010).	25
Gambar 2.10.	Pengaruh penambahan admixture berbahan dasar naphthalene (NP) dan polycarboxylate (PC) terhadap spread area (Xie & Kayali, 2016).....	28
Gambar 2.11.	Pengaruh penambahan air, kandungan SP, molaritas NaOH, rasio larutan alkali/fly ash, rasio NaOH/Na ₂ SiO ₃ terhadap nilai slump beton geopolimer (Aliabdo et al., 2016).	29
Gambar 2.12.	Pengaruh kandungan CaO terhadap waktu pengikatan (Diaz-Loya et al., 2011).	32
Gambar 2.13.	Pengaruh rasio alkali aktivator dengan fly ash terhadap kuat tekan dan pengikatan awal (Kamhangrittirong et al., 2011).	33
Gambar 2.14.	Pembuatan ferosemen: (a) manual dengan tangan (b) disemprot (https://www.civilclick.com).....	34
Gambar 2.15.	Bentuk wire mesh: (a). welded wire mesh, (b). woven wire mesh, (c). expanded wire mesh, (d). hexagonal wire mesh (Ghazy et al., 2022; Lalaj et al., 2015).....	37

Gambar 2.16. Perkuatan silinder menggunakan ferosemen (Kaish et al., 2015).	37
Gambar 2.17. Jenis material wire mesh (a). galvanized iron mesh (b). polypropylene mesh (Mughal et al., 2019).	39
Gambar 2.18. Hubungan antara kuat lentur dan lama curing pada satu, tiga dan lima lapis mesh (Yerramala et al., 2013).....	40
Gambar 2.19. Mekanisme kerusakan pada beton (K. Chen et al., 2021).....	41
Gambar 2.20. Penampilan fisik mortar setelah direndam pada larutan HCl dan H ₂ SO ₄ selama 24 bulan (M. Vafaei et al., 2018).	45
Gambar 2.21. Pengukuran kedalaman degradasi (Ren et al., 2020).	46
Gambar 2.22. Hasil pengujian karbonasi; (a) rendam PDAM, (b) PDAM wet dry, (c) air rawa wet dry (Ezardika, 2021; Inayah, 2021)	47
Gambar 2.23. Faktor-faktor yang mempengaruhi daya tahan geopolimer (Amran et al., 2021).	48
Gambar 2.24. Penurunan kuat tekan beton geopolimer (GC) dan beton OPC setelah terekspose Asam sulfat 2% (Okoye et al., 2017).	49
Gambar 2.25. Elemen struktur pracetak (Wikipedia, 2023).	51
Gambar 2.26. Setting pengujian kuat tekan pasta geopolimer.....	55
Gambar 2.27. Setting pengujian kuat tekan mortar.	56
Gambar 2.28. Pengujian lentur (Badan Standardisasi Nasional, 2011).	56
Gambar 2.29. Patah pada 1/3 bentang tengah (Persamaan (2-9)).	58
Gambar 2.30. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada < 5% dari bentang (Persamaan (2-10)).	58
Gambar 2.31. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang.	58
Gambar 2.32. Pengaruh molaritas NaOH dan suhu curing terhadap penyerapan air (Ourgessa et al., 2022)	59
Gambar 3.1. Kerangka rangkaian penelitian.....	64
Gambar 3.2. Kerangka penelitian tahap pertama.....	66
Gambar 3.3. NaOH flakes.....	67

Gambar 3.4.	Natrium silikat (Na_2SiO_3).....	67
Gambar 3.5.	Persentase perbandingan komposisi pasta dan mortar geopolimer.....	69
Gambar 3.6.	Proses persiapan material <i>fly ash</i> ; (a). Proses pengambilan, (b). Proses pengeringan; (c). Proses penyaringan; (d). <i>Fly ash</i> siap digunakan	71
Gambar 3.7.	Plastiment-VZ.....	71
Gambar 3.8.	Pembuatan larutan 8M NaOH	72
Gambar 3.9.	Pembuatan larutan alkali	72
Gambar 3.10.	Penimbangan material pembentuk pasta geopolimer	73
Gambar 3.11.	Cetakan silinder dari pipa PVC	73
Gambar 3.12.	Pembuatan pasta geopolimer	74
Gambar 3.13.	Proses perawatan (<i>curing</i>) pasta geopolimer.....	74
Gambar 3.14.	(a). Saringan pasir no. 4; (b) proses penyaringan agregat halus; (c) penimbangan agregat halus	75
Gambar 3.15.	Pembuatan mortar geopolimer	75
Gambar 3.16.	Cetakan mortar dan mortar geopolimer yang telah dicetak.....	76
Gambar 3.17.	Perawatan mortar geopolimer.....	76
Gambar 3.18.	Alat <i>Vicat</i> pada pengujian waktu pengikatan	79
Gambar 3.19.	Benda uji di dalam oven	80
Gambar 3.20.	Benda uji di rendam selama tiga hari; (a) mortar geopolimer; (b) mortar semen.....	80
Gambar 3.21.	Benda uji direbus	81
Gambar 3.22.	Benda uji dimasukkan dalam oven.....	82
Gambar 3.23.	Benda uji dimasukkan dalam wadah tertutup rapat.....	82
Gambar 3.24.	Bungkus keliling benda uji dengan plastik.....	83
Gambar 3.25.	Rendam benda uji setinggi 2-3 mm.....	83
Gambar 3.26.	Kerangka penelitian tahap kedua dan ketiga.	88

Gambar 3.27. Pembuatan mortar semen.	90
Gambar 3.28. Tulangan yang sudah di las	96
Gambar 3.29. Proses pemotongan <i>wire mesh</i>	97
Gambar 3.30. Tulangan dan <i>wire mesh</i> yang telah dirakit.....	97
Gambar 3.31. Tahu mortar geopolimer	97
Gambar 3.32. Tahu mortar semen	98
Gambar 3.33. Penempatan rangkaian tulangan dan <i>wire mesh</i> pada cetakan.....	98
Gambar 3.34. Penempatan tulangan dalam pelat	98
Gambar 3.35. Pembuatan feroeopolimer (a) dan ferosemen (b)	99
Gambar 3.36. Feroeopolimer (a) dan ferosemen (b).....	99
Gambar 3.37. Feroeopolimer (a) dan ferosemen (b) setelah dikeluarkan dari cetakan.....	99
Gambar 3.38. Perawatan feroeopolimer (a) dan ferosemen (b)	100
Gambar 3.39. Panel pelat yang telah di cat dan digaris kotak-kotak	100
Gambar 3.40. <i>Set-up</i> pengujian kuat lentur pelat panel	101
Gambar 3.41. Detail pengujian lentur pelat	102
Gambar 4.1. Hasil analisa saringan agregat halus.....	104
Gambar 4.2. Waktu pengikatan pasta geopolimer.	106
Gambar 4.3. Pengaruh umur pengujian terhadap kuat tekan pasta geopolimer: (a) rasio alkali 1; (b) rasio alkali 1,5; (c) rasio alkali 2; (d) rasio alkali 2,5.....	109
Gambar 4.4. Pengaruh <i>superplasticizer</i> dan rasio alkali terhadap kuat tekan.	110
Gambar 4.5. Pengaruh rasio alkali dan persentase SP terhadap kuat tekan mortar: (a) 14 hari; (b) 28 hari.....	114
Gambar 4.6. Hubungan antara kuat tekan pasta dan mortar geopolimer	115
Gambar 4.7. Pengaruh sifat fisik mortar terhadap kuat tekan.	117

Gambar 4.8. Penyerapan air kumulatif terhadap waktu	120
Gambar 4.9. <i>Sorptivity</i> mortar geopolimer dan mortar semen	121
Gambar 4.10. Kuat tekan mortar geopolimer setelah terekspose lingkungan....	123
Gambar 4.11. Kuat Tekan rata-rata mortar semen setelah terekspose lingkungan	125
Gambar 4.12. Durabilitas mortar geopolimer dan mortar semen pada <i>full</i> rendam asam.....	126
Gambar 4.13. Durabilitas mortar geopolimer dan mortar semen pada siklus <i>wet-dry</i> asam.....	127
Gambar 4.14. Durabilitas mortar geopolimer dan mortar semen pada <i>full</i> rendam air PDAM	129
Gambar 4.15. Durabilitas mortar geopolimer dan mortar semen pada air PDAM dengan siklus <i>wet-dry</i>	129
Gambar 4.16. Kuat lentur ferogeopolimer setelah terekspose lingkungan	141
Gambar 4.17. Kuat lentur ferosemen setelah terekspose lingkungan	142
Gambar 4.18. Durabilitas ferogeopolimer dan ferosemen pada <i>full</i> rendam asam.....	144
Gambar 4.19. Durabilitas ferogeopolimer dan ferosemen pada <i>wet-dry</i> asam..	145
Gambar 4.20. Durabilitas ferogeopolimer dan ferosemen pada <i>full</i> rendam normal.....	146
Gambar 4.21. Durabilitas ferogeopolimer dan ferosemen pada <i>wet-dry</i> normal.....	147
Gambar 4.22. Visual ferogeopolimer (a) dan ferosemen (b)	148

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Perhitungan molar rasio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	174
Lampiran 2.	Data densitas, penyerapan air dan porositas	175
Lampiran 3.	Data pengujian <i>sorptivity</i>	177
Lampiran 4.	Kuat tekan mortar geopolimer setelah terekspos lingkungan.....	182
Lampiran 5.	Kuat tekan mortar semen setelah terekspos lingkungan.....	184
Lampiran 6.	Kuat lentur ferogeopolimer	186
Lampiran 7.	Kuat lentur ferosemen	188

DAFTAR ISTILAH

- Admixture* : bahan tambah kimia pada campuran beton untuk mengubah sifat-sifat beton segar atau beton keras.
- Curing* : Proses perawatan beton sejak dibuka dari cetakan sampai dengan waktu pengujian
- Larutan alkali (alkali aktivator) : Campuran antara Na_2SiO_3 dan NaOH
- Mortar semen : Campuran antara pasta semen dengan agregat halus (pasir)
- Mortar geopolimer : Campuran antara pasta geopolimer dengan agregat halus (pasir)
- Plasticizer* : bahan tambah kimia yang berfungsi untuk memperbaiki karakteristik beton dengan cara memperbaiki *workability* beton, mengurangi kebutuhan air, memperlambat *setting*
- Pasta semen : Campuran antara semen dengan air
- Pasta geopolimer : Campuran antara material dasar (*fly ash*) dengan larutan alkali
- Rasio alkali : Perbandingan antara Na_2SiO_3 dengan NaOH
- Superplasticizer* : bahan tambah kimia type F yang disebut *high range admixture* yang berfungsi untuk memperbaiki karakteristik beton, mengurangi kebutuhan air tanpa mengurangi *workability* sehingga meningkatkan kuat tekan
- Slump* : Pengujian untuk mengukur tingkat kekentalan atau konsistensi campuran beton segar
- Setting Time* : Waktu pengikatan pasta.
- Setting* : Mengikatnya material pembentuk beton
- Workability* : kemudahan dan kemampuan beton untuk dikerjakan atau diproses selama tahap pencampuran, pengecoran, dan penyebarannya dalam formwork atau cetakan