

**PEMBUATAN GEOPOLIMER MENGGUNAKAN MATERIAL
BENTONIT DAN ABU DASAR**

Skripsi

Oleh

KARTIKA RATNA SARI



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PEMBUATAN GEOPOLIMER MENGGUNAKAN MATERIAL BENTONIT DAN ABU DASAR

Oleh

KARTIKA RATNA SARI

Penelitian mortar geopolimer menggunakan material seperti abu dasar, bentonit, NaOH, Na_2SiO_3 , superplastiser, aquades dan air. Ukuran mortar yang dibuat adalah $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$. Molaritas yang digunakan yaitu 6, 8, dan 10 M. Proses pemanasan dilakukan pada suhu 60 dan 80°C selama 8 jam. Variasi komposisi terdiri dari A1, A2, A3, A4, dan A5, Pengujian sampel mortar geopolimer meliputi uji kuat tekan dan uji massa jenis yang mempunyai hasil terbaik pada variasi komposisi A2 di suhu 80°C. Karakterisasi sampel berupa XRF dan SEM. Senyawa penyusun mortar geopolimer didominasi oleh SiO_2 , Al_2O_3 dan Fe_2O_3 . Karakterisasi SEM dengan hasil terbaik memiliki morfologi lebih merata dan pori-pori yang semakin kecil.

Kata kunci: Abu dasar, bentonit, geopolimer, dan mortar.

ABSTRACT

**MANUFACTURING GEOPOLYMER USING
BENTONITE AND BOTTOM ASH**

By

KARTIKA RATNA SARI

Geopolymer mortar research uses materials such as bottom ash, bentonite, NaOH, Na_2SiO_3 , superplasticizer, distilled water and water. The size of the mortar made is $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$. The molarities used were 6, 8, and 10 M. The heating process was carried out at temperatures of 60 and 80°C for 8 hours. The composition variations consist of A1, A2, A3, A4, and A5. Testing of geopolymer mortar samples includes compressive strength tests and density tests which have the best results for composition variations A2 at a temperature of 80°C. Sample characterization in the form of XRF and SEM. The compounds that make up geopolymer mortar are dominated by SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 . SEM characterization with the best results has a more even morphology and smaller pores.

Keywords: *Bottom ash, bentonite, geopolymer, and mortar,*

**PEMBUATAN GEOPOLIMER MENGGUNAKAN MATERIAL
BENTONIT DAN ABU DASAR**

Oleh

KARTIKA RATNA SARI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

**Pada Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi : **PEMBUATAN GEOPOLIMER
MENGUNAKAN MATERIAL BENTONIT
DAN ABU DASAR**

Nama Mahasiswa : **Kartika Ratna Sari**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1717041007

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si. Ph.D.
NIP. 195903091991031001

Iqbal Firdaus, S.Si. M.Si.
NIP. 199006162019031016

2. Ketua Jurusan Fisika

Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si. Ph.D.**

Sekretaris : **Iqbal Firdaus, S.Si. M.Si.**

Penguji

Bukan Pembimbing: **Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si.**

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dr. Eng. Heri Satria, S.Si. M.Si.
NIP. 19711001 200501 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **14 Juni 2024**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam skripsi ini tidak terdapat karya orang lain dan tidak terdapat pendapat atau karya yang ditulis oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka, selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan ini tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 14 Juni 2024

Penulis,



Kartika Ratna Sari
NPM. 1717041007

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Kartika Ratna sari dilahirkan di Bandar Lampung, Provinsi Lampung pada tanggal 3 Agustus 1999. Beliau merupakan anak pertama Tunggal yang lahir dari pasangan Bapak Heri Budi Susilo dan Ibu Endang Suprpti. Ia menempuh pendidikan di TK Taruna Jaya Bandar Lampung tahun 2004-2005, SD Negeri 2 Perumnas Way Halim pada tahun 2005- 2011, SMP Negeri 29 Bandar Lampung pada tahun 2011-2014, dan SMAS Al-Azhar 3 Bandar Lampung pada tahun 2014-2017. Pada tahun 2017, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Selama menempuh jenjang pendidikan S1 di Fisika FMIPA Unila, penulis mengambil kelompok keilmuan bidang Fisika Material. Penulis juga aktif dalam kegiatan keorganisasian dengan menjabat sebagai anggota pengurus Himpunan Mahasiswa Fisika (Himafi) Jurusan Fisika FMIPA Unila tahun 2018-2019. Pada tahun 2020 penulis mengikuti program KKN di Kelurahan Perumnas Way Kandis, Tanjung Senang, Bandar Lampung. Kemudian tahun 2021, penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Laboratorium Fisika Dasar FMIPA Unila. Selanjutnya, pada bulan September 2021 penulis melakukan penelitian terkait tugas akhir yang berjudul “PEMBUATAN GEOPOLIMER MENGGUNAKAN MATERIAL BENTONIT DAN ABU DASAR” yang bertempat di Pusat Riset Teknologi Pertambangan-Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang, Lampung

MOTTO

“"Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan."

"Maka apabila kamu telah selesai (dari sesuatu urusan), kerjakanlah dengan
sungguh-sungguh (urusan) yang lain.".”

(Q.S Al-Insyirah:1-8)

”Aku sudah melihat segala bentuk rezeki, tapi tidak aku temukan rezeki yang
lebih baik daripada kesabaran.”

(Ummar Bin Khattab)

“Jangan menyerah dan tetap semangat!!!”

(Kartika Ratna Sari)

PERSEMBAHAN

**Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, penulis
mempersembahkan Karya ini kepada:**

Ibuku Endang Suprapti dan Ayahku Heri Budi Susilo

Terimakasih karena selalu mendoakan, memberikan dukungan, dan menemani selama ini yang tak pernah henti. Terimakasih telah menjadi orang tua yang sangat baik hingga berhasil mendidik dan mampu mencapai gelar sarjana.

Bapak-Ibu Dosen

Terimakasih atas segala ilmu pengetahuan yang telah diberikan, semoga dapat bermanfaat dan menjadi amal untuk Bapak-Ibu Dosen.

Keluarga Besar Sukadar dan Suyitno

Terimakasih selalu mendukung dan nasihat yang baik kepada penulis.

Teman-teman seperjuangan Fisika FMIPA Unila 2017

dan

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

KATA PENGANTAR

Segala puji kepada Allah Subhanahu wa ta'ala yang telah memberikan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pembuatan Geopolimer Menggunakan Material Bentonit dan Abu Dasar”. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains. Penggunaan material bentonit dan abu dasar diharapkan dapat memberikan efek lebih baik terhadap produk geopolimer dengan dilakukannya karakterisasi XRF dan SEM.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penelitian dan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk memperbaiki kekurangan dalam skripsi ini. Harapannya skripsi ini dapat bermanfaat dan digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

Bandar Lampung, 14 Juni 2024

Kartika Ratna Sari

SANWACANA

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan kemudahan dan kelancaran, berkat karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“PEMBUATAN GEOPOLIMER MENGGUNAKAN MATERIAL BENTONIT DAN ABU DASAR.** Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya banyak bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D., sebagai pembimbing utama yang telah memberikan waktu, ilmu, dan arahan dalam penelitian ini.
2. Bapak Iqbal Firdaus, S.Si., M.Si., sebagai pembimbing kedua yang membantu dan memberi masukan dalam penelitian ini.
3. Bapak Muhammad Amin, S.T., sebagai pembimbing penelitian yang selalu membimbing, membantu dan memberi masukan pada proses penelitian dan penulisan skripsi ini.
4. Bapak Drs. Pulung Karo-Karo, M.Si., sebagai dosen pembahas yang telah memberikan saran dalam penulisan skripsi ini agar lebih baik lagi.
5. Staff Pusat Riset Teknologi Pertambangan-Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN), yang telah membantu dalam penelitian yang dilakukan di lapangan.
6. Kepala Laboratorium Mineral Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) yang telah membantu dalam karaktersisasi sampel penelitian.

7. Kepala Pusat Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) yang telah memberikan izin untuk melakukan penelitian di lapangan.
8. Kedua Orang Tua, Ibu Endang Suprpti dan Bapak Heri Budi Susilo yang selalu mendoakan, mendukung, dan memberikan nasihat kepada penulis hingga mampu menyelesaikan skripsi ini.
9. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
10. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D., sebagai dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis.
11. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Fisika atas ilmu dan nasihat yang telah diberikan selama penulis menempuh bangku perkuliahan.
12. Keluarga besar Sukadar dan Suyitno yang mendoakan penulis.
13. M. Rizan Mulya yang memberikan dukungan semangat, dukungan, dan doa.
14. Ananda Haviana Putri sebagai sahabat yang memberikan dukungan.
15. Serta teman-teman seperjuangan Fisika angkatan 2017.

Serta berbagai pihak yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Semoga Allah Subhanahu wa ta'ala dapat membalas seluruh kebaikan dan mempermudah segala urusannya.

Bandar Lampung, 14 Juni 2024

Penulis

Kartika Ratna Sari

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	i
ABSTACT.....	ii
HALAMAN JUDUL.....	iii
LEMBAR PERSETUJUAN.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
PERNYATAAN.....	vi
RIWAYAT HIDUP.....	vii
MOTTO.....	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA.....	xi
DAFTAR ISI.....	xviii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xviii
 I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	6

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1	Geopolimer	7
2.1.1	Definisi Geopolimer	7
2.1.2	Mortar Geopolimer	9
2.2	Abu Dasar	10
2.3	Bentonit	11
2.4	Alkali Aktivator	13
2.4.1	Natrium Hidroksida (NaOH)	13
2.4.2	Natrium Silikat (Na_2SiO_3)	14
2.5	Pengurang air kisaran tinggi	15
2.6	Air	17
2.7	Karakterisasi Material	17
2.7.1	<i>X-ray Fluorescence</i> (XRF)	17
2.7.2	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	19
2.8	Kuat Tekan	21
2.9	Massa Jenis	21

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	22
3.2	Alat dan Bahan	22
3.2.1	Alat Penelitian	22
3.2.2	Bahan Penelitian	22
3.3	Prosedur Penelitian	23
3.3.1	Preparasi Sampel	23
3.3.2	Pencetakan Sampel	24
3.3.3	Pengujian Sampel	25
3.3.4	Karakterisasi Sampel	25
3.4	Diagram Alir	26
3.4.1	Preparasi Sampel	26
3.4.2	Pembuatan Sampel	27
3.4.3	Pengujian Sampel	28
3.4.4	Karakterisasi XRF dan SEM	29

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel Mortar Geopolimer	30
4.2	Hasil Pengujian Massa Jenis Sampel Mortar Geopolimer	32
4.3	Hasil Karakterisasi XRF Sampel Mortar Geopolimer	35
4.4	Hasil Karakterisasi SEM Sampel Mortar Geopolimer	37

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	42
5.2	Saran	43

VI. DAFTAR PUSTAKA

VII. LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Struktur geopolimer	7
Gambar 2.2. Skema reaksi geopolimerisasi.....	8
Gambar 2.3. Abu dasar	11
Gambar 2.4. Bentonit	12
Gambar 2.5. Serpihan NaOH.....	14
Gambar 2.6. Natrium silikat	15
Gambar 2.7. <i>Superplasticizier</i>	16
Gambar 2.8. Prinsip kerja XRF	18
Gambar 2.9. Alat SEM	20
Gambar 2.10. Hasil uji SEM geopolimer abu dasar	20
Gambar 3.1. Diagram alir preparasi larutan NaOH.....	26
Gambar 3.2. Diagram alir preparasi larutan sampel	26
Gambar 3.3. Diagram alir pembuatan sampel	27
Gambar 3.4. Diagram alir uji kuat tekan	28
Gambar 3.5. Diagram alir uji massa jenis	28
Gambar 3.6. Diagram alir karakterisasi XRF dan SEM.....	29
Gambar 4.1. Morfologi hasil uji SEM sampel A4 dengan molaritas 6 M pada suhu 80°C.....	37
Gambar 4.2. SEM-Mapping sampel A4 dengan molaritas 6 M pada suhu 80°C.....	38

Gambar 4.3.	Morfologi hasil uji SEM sampel A2 dengan molaritas 10 M pada suhu 80°C	39
Gambar 4.4.	SEM-Mapping sampel A2 dengan molaritas 10 M pada suhu 80°C.....	40

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Sifat fisik abu dasar	10
Tabel 2.2. Unsur-unsur kimia dalam bentonit	13
Tabel 2.3. Tabel kimia <i>superplasticizer</i>	16
Tabel 2.4. Hasil XRF abu dasar	19
Tabel 3.1. Variasi komposisi mortar geopolimer	24
Tabel 4.1. Hasil uji kuat tekan mortar geopolimer pada suhu 60°C.....	30
Tabel 4.2. Hasil uji kuat tekan mortar geopolimer pada suhu 80°C.....	31
Tabel 4.3. Hasil uji massa tekan mortar geopolimer pada suhu 60°C.....	33
Tabel 4.4. Hasil uji massa tekan mortar geopolimer pada suhu 80°C.....	33
Tabel 4.5. Hasil analisis XRF bahan abu dasar dan bentonit	35
Tabel 4.6. Hasil karakterisasi sampel geopolimer menggunakan XRF	36

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangunan konstruksi di Indonesia mengalami perkembangan yang cukup pesat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk terutama di kota-kota besar yang menyebabkan peningkatan kebutuhan terhadap sarana dan prasarana seperti rumah, gedung, jembatan, jalan raya dan lain-lain. Adanya pembangunan infrastruktur yang semakin meningkat menyebabkan banyaknya permintaan jumlah produksi semen. Semen portland sebagai pengikat merupakan material yang digunakan dalam pembuatan beton konvensional. Pada proses produksinya, terjadi emisi gas CO₂ ke udara yang besarnya sebanding dengan jumlah semen yang diproduksi sehingga menimbulkan pencemaran udara yang tidak baik untuk lingkungan (Davidovits, 1991). Dalam mengatasi efek buruk tersebut dibutuhkan material alternatif lain sebagai pengganti semen. Mortar geopolimer merupakan mortar yang tidak menggunakan semen sebagai bahan pengikat, melainkan memakai material yang banyak mengandung unsur silika dan alumina.

Pembuatan mortar geopolimer dilakukan dengan cara mencampurkan larutan NaOH dan Na₂SiO₃ yang dikenal sebagai alkali aktivator kemudian dicampur bersamaan dengan abu dasar, bentonit, dan komposisi tertentu sehingga menghasilkan butiran halus mirip semen (semen geopolimer). Semen geopolimer ini cukup ditambahkan air saja dalam penggunaannya (Susanto, 2016). Dalam pembuatan campuran bahan pengikat geopolimer, metode percampuran basah yang digunakan yaitu perbandingan abu dasar terhadap larutan aktivator, oleh karena itu dibutuhkan konversi dari metode percampuran basah ke metode

percampuran kering (SNI, 2000). Dalam proses polimerisasi Na_2SiO_3 berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan NaOH sebagai oksidasi alkali yang reaktif dan merupakan basa yang kuat untuk mereaksikan unsur-unsur alumina dan silika (Ekaputri dan Triwulan, 2013). Salah satu material yang mengandung silika dan alumina yaitu abu dasar.

Abu dasar merupakan salah satu hasil dari limbah batubara yang digunakan sebagai sumber energi industri-industri di dunia terutama di Indonesia. Pada umumnya abu dasar memiliki ukuran butiran seperti agregat halus yang lolos saringan nomor 4 (4,75 mm). Jumlah limbah abu dasar yang semakin meningkat tanpa adanya pengelolaan atau daur ulang yang berkelanjutan, tidak menutup kemungkinan lingkungan sekitarnya akan mudah terkena polusi akibat limbah tersebut. Adanya pemanfaatan abu dasar sebagai bahan pengganti agregat halus dalam pembuatan semen, dapat mengurangi pencemaran lingkungan akibat penumpukan limbah abu dasar dari sisa pembakaran batubara. Kandungan senyawa kimia pada abu dasar didominasi oleh senyawa silika dan alumina. Selain abu dasar material yang berpotensi digunakan sebagai campuran mortar geopolimer adalah bentonit.

Bentonit adalah bahan galian yang kaya akan kandungan Na. Natrium ini adalah suatu unsur yang mempunyai sifat mengembang. Apabila kadar Natrium dalam bentonit belum mencapai standart, maka ditambahkan NaOH supaya bentonit dapat mengembang dengan sempurna. Dalam bentonit kandungan Na_2O lebih besar dari pada kandungan CaO , sehingga sifat pengembangannya atau pembuihannya lebih sempurna bentonit daripada semen biasa. Bentonit dengan kandungan natrium sebagai kation utama mengalami pengembangan volume hingga beberapa kali bila terkena campuran air (*swelling*) sehingga mampu mengikat air. Apabila dicelupkan ke dalam air, Na-bentonit memiliki daya mengembang hingga delapan kali dan tetap terdispersi selama beberapa saat dalam air. Na-bentonit berwarna putih atau krem bila dalam keadaan kering dan mengkilap jika keadaan basah terkena matahari. Na- bantonit memiliki ciri mengandung ion Na relatif banyak (Jhauharatul, 2017). Karakteristik tersebut membuat natrium bentonit dapat diaplikasikan pada bidang konstruksi.

Pada saat ini, beberapa penelitian terkait penggunaan geopolimer telah banyak dikembangkan, diantaranya:

1. Yanuari, dkk (2020) melakukan penelitian dengan menggunakan suhu 28, 60, dan 100°C untuk pemanasan mortar geopolimer. Penelitian ini disimpulkan bahwa suhu curing 100°C menghasilkan kuat tekan tertinggi. Hal ini disebabkan oleh suhu curing yang semakin tinggi sehingga membuat kuat tekan menjadi tinggi juga karena saat suhu ruang, proses geopolimerisasi sangat lemah.
2. Suarnita (2012) melakukan penelitian tentang pemanfaatan abu dasar sebagai pengganti agregat halus pada campuran beton. Penelitian ini memvariasikan bahan tambah abu dasar antara lain 10, 20, 30, dan 40% sebagai pengganti sebagian agregat halus. Hasil pengujian kuat tekan beton rata-rata diperoleh umur 28 hari. Pada beton normal dan beton dengan penggunaan abu dasar sebagai pengganti agregat halus dengan variasi 0, 10, 20, 30, dan 40% dari berat agregat halus adalah sebesar 20,524, 20,444, 19,982, 20,756, dan 19,556 MPa. Kuat tekan beton maksimal didapatkan pada variasi 30% dan kuat tekan terendah pada variasi 40%. Kuat tekan pada umur 28 hari terjadi penurunan kuat tekan pada variasi 10, 20, dan 40% dari beton normal antara 0,389, 2,640, dan 4,716% sedangkan pada variasi 30% terjadi peningkatan kuat tekan dari beton normal sebesar 1,130%.
3. Budh dan Warhade (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh molaritas terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Pada penelitian ini disimpulkan bahwa molaritas memiliki pengaruh terhadap kuat tekan.
4. Yuwono (2017) melakukan penelitian dengan menggunakan variasi NaOH sebesar 8 dan 10 M. Hasil yang didapatkan kuat tekan tertinggi dengan penggunaan NaOH 10 M. Konsentrasi kepekatan molaritas 10 M lebih pekat dibandingkan 8 M sehingga membuat pengikatan antara unsur Al dan Si menjadi lebih baik.
5. Santosa dan Barata (2020) melakukan penelitian tentang pengaruh penggantian sebagian semen dengan bentonit terhadap kuat tekan beton. Persentase bentonit sebagai pengganti sebagian semen sebesar 0, 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, dan 20% dari berat semen. Nilai kuat tekan beton pada penggantian sebagian semen dengan bentonit presentasi 0% adalah sebesar 24,44 MPa, 2,5% sebesar 24,60

MPa, 5% sebesar 24,96 MPa, 7,5% sebesar 26,53 MPa, kemudian terjadi penurunan secara signifikan pada presentasi 10% sampai 20% dimana nilai kuat tekan beton 10% sebesar 22,21 MPa, 12,5% sebesar 20,34 MPa, 15% sebesar 17,75 MPa, 17,5% sebesar 16,65 MPa, dan 20% sebesar 14,99 MPa. Penurunan kuat tekan diakibatkan oleh campuran beton segar tidak homogen karena kesulitan pada saat pengadukan, hal ini terjadi karena adanya peresapan air oleh bentonit. Pada pengujian kuat tekan terhadap penggantian sebagian semen dengan bentonit diperoleh kuat tekan minimum pada variasi 20% yaitu dengan rata-rata kuat tekan beton sebesar 14,99 MPa dan kuat tekan maksimal pada variasi 7,5% yaitu dengan rata-rata kuat tekan beton sebesar 26,53 MPa.

Pada penelitian kali ini dilakukan pembuatan mortar geopolimer menggunakan beberapa material diantaranya abu dasar, bentonit, NaOH, Na_2SiO_3 , *superplasticizer*, aquades dan air. Abu dasar berfungsi sebagai pengganti agregat halus dalam pembuatan mortar yang menghasilkan kuat tekan dan ketahanan abrasi lebih rendah dibandingkan tanpa campuran abu dasar. Hal ini berkaitan dengan kuat tekan mortar dimana semakin tinggi kuat tekan maka semakin tinggi pula ketahanan abrasinya (Singh dan Siddique, 2015). Bentonit digunakan karena memiliki kandungan kimia seperti SiO_2 dan Al_2O_3 yang tinggi sehingga bentonit digunakan sebagai bahan pengganti semen yang menghasilkan kuat tekan mortar maksimal. Bentonit juga berfungsi sebagai pengisi pori pada campuran geopolimer (Aprizal, 2015). *Superplasticizer* digunakan sebagai zat aditif yang berfungsi untuk meningkatkan kemampuan kerja (*workability*) pada mortar. Air berfungsi membasahi agregat pada mortar. Larutan NaOH dan Na_2SiO_3 berperan sebagai larutan alkali aktivator yang dapat mempercepat jalannya reaksi geopolimerisasi pada pembuatan geopolimer. Larutan NaOH menggunakan beberapa variasi konsentrasi yaitu 6, 8, dan 10 M. Aktivator yang sering digunakan yaitu larutan NaOH 8 M sampai 14 M dan Na_2SiO_3 (Hardjito dan Rangan, 2005). Sampel dicetak berbentuk kubus dengan ukuran $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$. Sampel menggunakan variasi suhu 60 dan 80°C selama 8 jam. Uji fisis yang dilakukan pada penelitian ini yaitu pengujian massa jenis untuk mengukur konsentrasi suatu zat. Sedangkan, uji mekanis yang dilakukan pada penelitian ini yaitu pengujian kuat tekan untuk menentukan mutu dan kualitas mortar. Selain itu, sampel akan dikarakterisasi

dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia yang terbentuk dalam material yang digunakan dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui morfologi permukaan pada mortar geopolimer.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik mekanis pada mortar geopolimer dengan variasi komposisi dan suhu.
2. Bagaimana karakteristik fisis pada mortar geopolimer dengan variasi komposisi dan suhu.
3. Bagaimana komposisi kimia yang terbentuk pada material bentonit dan abu dasar.
4. Bagaimana komposisi kimia yang terbentuk pada mortar geopolimer menggunakan material bentonit dan abu dasar.
5. Bagaimana morfologi permukaan yang terbentuk pada mortar geopolimer menggunakan material bentonit dan abu dasar.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui karakteristik mekanis mortar geopolimer menggunakan pengujian massa jenis.
2. Mengetahui karakteristik fisis mortar geopolimer menggunakan pengujian kuat tekan.
3. Mengetahui komposisi kimia yang terbentuk pada material bentonit dan abu dasar menggunakan alat XRF.
4. Mengetahui komposisi kimia yang terbentuk pada mortar geopolimer menggunakan alat XRF.
5. Mengetahui morfologi permukaan yang terbentuk pada mortar geopolimer menggunakan alat SEM.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Abu dasar berasal dari PLTU Tarahan, Lampung Selatan.
2. Bentonit berasal dari Jawa Tengah.
3. Air yang digunakan berasal dari Tanjung Bintang, Lampung Selatan.
4. NaOH yang digunakan jenis teknis berasal dari Banten.
5. Larutan alkali yang digunakan NaOH dengan variasi 6, 8, 10 M dan Na_2SiO_3 .
6. Variasi suhu 60 dan 80°C dengan waktu 8 jam.
7. Sampel berbentuk kubus dengan ukuran $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$.
8. Uji fisis sampel berupa massa jenis.
9. Uji mekanis sampel berupa kuat tekan.
10. Karakterisasi sampel yang dilakukan meliputi XRF dan SEM.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

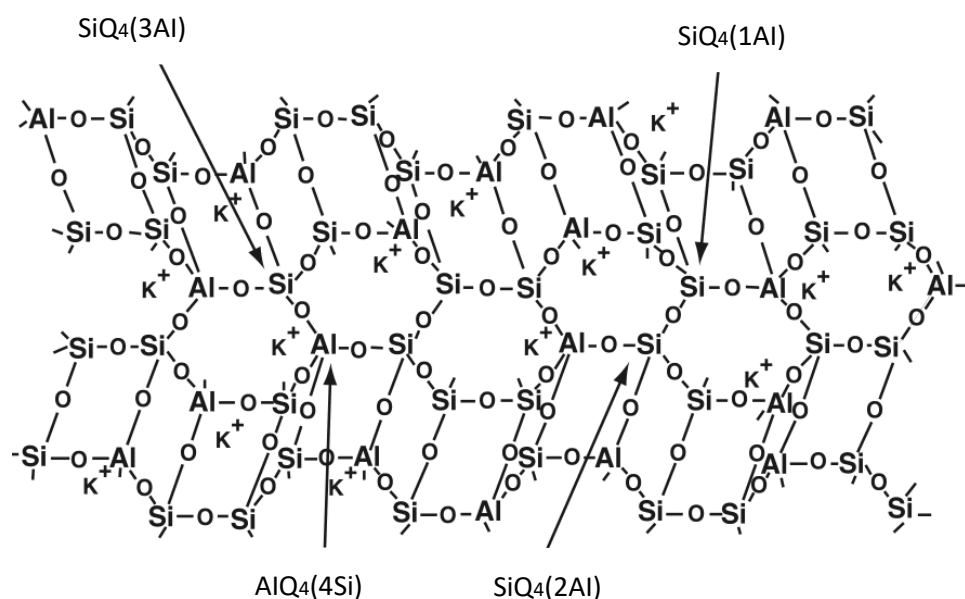
1. Memanfaatkan abu dasar dan bentonit sebagai material alternatif pengganti semen dalam pembuatan mortar geopolimer.
2. Mengetahui pengaruh penggunaan bahan tambahan berupa abu dasar dan bentonit pada sifat dan karakteristik mortar geopolimer.
3. Memberikan wawasan bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam pembuatan mortar geopolimer.
4. Menambah literatur pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geopolimer

2.1.1 Definisi Geopolimer

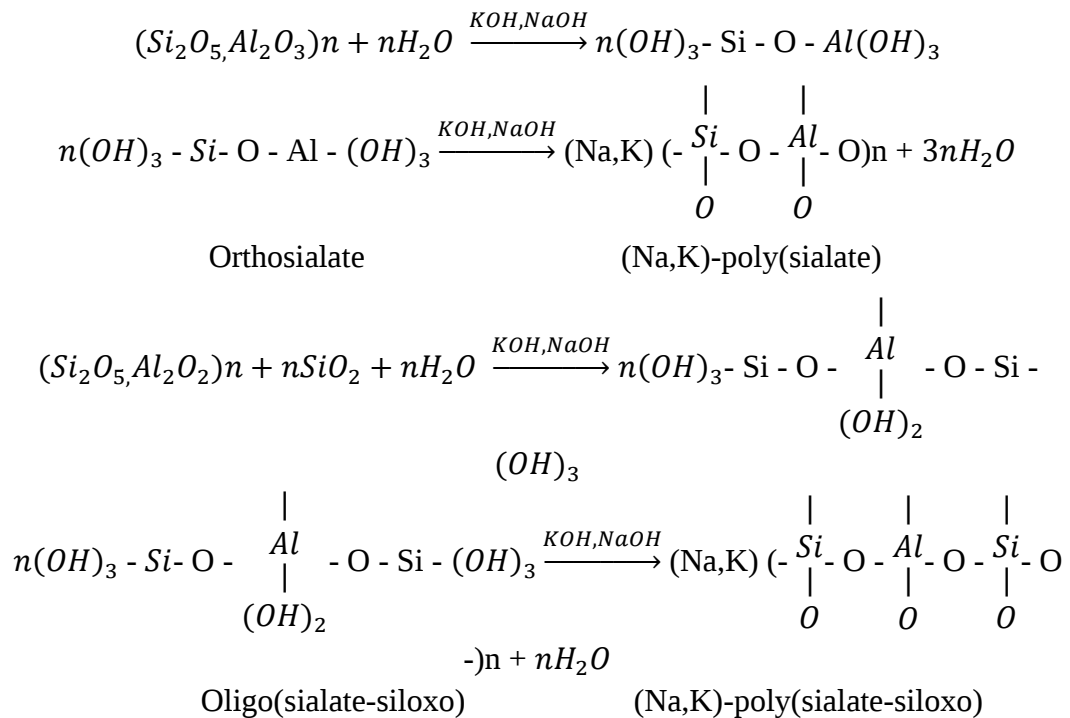
Davidovits pada tahun 1978 memperkenalkan teknologi geopolimer. Geopolimer adalah bahan polimer anorganik yang terbentuk melalui reaksi antara sumber aluminosilikat dan larutan silikat yang basa, diikuti dengan pengawetan pada suhu ruangan atau sedikit lebih tinggi. Proses pembentukannya disebut sebagai reaksi geopolimerisasi. Proses polimerisasi melibatkan reaksi kimia yang sangat cepat dalam kondisi basa pada mineral Si-Al yang menghasilkan rantai polimer tiga dimensi dan struktur cincin yang terdiri dari ikatan Si-O-Al. Reaksi dari padatan alumina silikat dengan larutan alkali atau larutan silikat berkonsentrasi tinggi menghasilkan material alkali aluminasilikat sintetis yang pada umumnya disebut dengan “geopolimer” seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Struktur geopolimer (Davidovits, 2013).

Geopolimer merupakan bentuk anorganik alumina-silika dari material yang didapatkan dari alam atau limbah dari industri. Bahan yang bisa digunakan dalam membuat geopolimer biasanya diperoleh dari abu terbang, abu sekam dari tumbuhan, abu dasar, dan abu dari alam yang banyak mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) (Putra dkk., 2014).

Geopolimer merupakan produk beton geosintetik dimana reaksi pengikatan yang terjadi adalah reaksi polimerisasi. Dalam reaksi polimerisasi, silika (Si) dan alumina (Al) memiliki peran yang penting dalam ikatan polimerisasi. Reaksi silika dan alumina dengan alkalin akan menghasilkan SiO dan AlO_4 (Gandina dan Y.Djoko, 2020). Dalam proses geopolimer, terjadi reaksi kimia antara alumina-silikat oksida ($\text{Si}_2\text{O}_5, \text{Al}_2\text{O}_3$) dengan alkali polisilikat yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al. Polisilikat umumnya berupa natrium atau kalium silikat yang diperoleh dari industri kimia sebagai produk sampingan. Skema reaksi geopolimerisasi dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Skema reaksi geopolimerisasi (Davidovits, 1991).

2.1.2 Mortar Geopolimer

Mortar geopolimer digunakan sebagai penambah lekatan pada bagian konstruksi tertentu. Mortar memiliki ukuran seperti kubus kecil dengan sisi 5 x 5 x 5 cm (Wijaya dkk, 2019). Berdasarkan SNI 03-6825-2002 mortar geopolimer dibuat dengan bahan pengikat sebagai pengganti semen seperti abu terbang atau abu dasar yang kaya akan SiO_2 dan Al_2O_3 . Bahan pengikat akan bereaksi dengan cairan alkalin untuk menghasilkan bahan pengikat (binder). Silika dan alumina yang terdapat dalam abu terbang atau abu dasar akan bereaksi dengan bantuan larutan natrium hidroksida (NaOH) dan larutan natrium silikat untuk mengikat agregat, pasir dan material lainnya sehingga menjadi mortar geopolimer (Steenie dan Servie, 2014). Material mortar geopolimer tersusun dari sintesa bahan-bahan alam non organik yang melalui proses polimerisasi, diantaranya material buangan hasil industri seperti abu dasar.

Material geopolimer apabila digabungkan dengan campuran agregat batuan dapat menghasilkan beton geopolimer tanpa menggunakan semen. Sintesa geopolimer aluminosilikat membutuhkan dua konstituen utama dalam reaksi pencampuran diantaranya (1) prekursor yang kaya akan kandungan Al dan Si bentuknya dapat berupa tanah liat, abu terbang, abu dasar, dan (2) larutan alkali silikat aktivator yang digunakan berupa larutan NaOH dan larutan natrium silikat (Rufikatul, 2019). Ada beberapa tipe mortar menurut SNI 03-6825-2002, diantaranya:

- a. Mortar tipe M memiliki kuat tekan sebesar 17,2 MPa (kuat tekan tinggi) digunakan sebagai dinding dekat tanah, adukan pipa kotor, adukan dinding penahan tanah, dan adukan untuk jalan.
- b. Mortar tipe S mempunyai kuat tekan sebesar 12,4 MPa (kuat tekan sedang) diperlukan untuk daya rekat tinggi.
- c. Mortar tipe N memiliki kuat tekan sebesar 5,2 MPa (kuat tekan rendah) berguna sebagai pasangan dinding yang tidak menahan beban dan tidak ada persyaratan tentang kekuatan.
- d. Mortar tipe O mempunyai kuat tekan sebesar 2,5 MPa (kuat tekan rendah) untuk konstruksi dinding yang tidak menahan beban berat dan pengaruh cuaca ringan.

2.2 Abu Dasar

Abu dasar adalah limbah yang dihasilkan dari sisa pembakaran batubara dan mengendap dibagian bawah ruang pembakaran (abu yang tertinggal dibawah tungku). Abu dasar mempunyai karakteristik fisik berwarna abu-abu gelap, berbentuk butiran, berporos, dan ukuran butiran antara pasir hingga kerikil. Kandungan mineral abu dasar di dominasi oleh senyawa silika dan alumina yang dapat digunakan sebagai material dalam geopolimer (Rafieizonooz *et al*, 2016).

a. Sifat Kimia

Komposisi kimia abu dasar sebagian besar tersusun dari unsur-unsur Si, Al, Fe, Ca, serta Mg, S, Na dan unsur kimia lainnya. Unsur dominan dari abu dasar yaitu SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe masing-masing sebesar 54,80%, 21,15% dan 11,96%.

b. Sifat Mekanis

Adanya *friable* partikel yang umumnya terdapat pada abu dasar yaitu kerak batu bara yang berbentuk seperti kembang). Partikel ini mudah hancur karena pemadatan dan berpori sehingga memiliki tingkat penyerapan yang tinggi.

c. Sifat Fisik

Sifat fisik abu dasar dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Sifat fisik abu dasar.

Sifat fisik	Abu dasar basah	Abu dasar kering
Bentuk	Angular	Granular
Warna	Hitam	Abu-abu gelap
Tampilan	Keras, mengkilap	Seperti pasir halus
Ukuran (% lolos ayakan)	No.4 (90-100%)	No.4 (50-90%)
	No.10 (40-60%)	No.10 (10-60%)
	No.40 (10%)	No.40 (0-10%)
<i>Specific gravity</i>	2,3-2,9	2,1-2,7
<i>Dry unit weight</i>	960-1440 kg/m^3	720-1600 kg/m^3
Penyerapan	0,3-1,1%	0,8-2,0%

Sumber: Coal Abu Dasar / Boiler Slag-Material Description, 2000.

Abu dasar sebagai agregat dalam geopolimer dapat digunakan dengan mengaktifkan larutan NaOH, Na_2CO_3 dan Na_2SiO_3 ataupun aktivator alkali lain dengan konsentrasi OH^- yang sangat tinggi. Penggunaan abu dasar sebagai pengganti agregat halus membuat mortar lebih stabil dan lebih memiliki ketahanan

kuat tekan daripada tanpa abu dasar (Singh dan Siddique, 2015). Bentuk Abu dasar dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Abu dasar (Sumber: Laboratorium Non-Logam Balai Penelitian Teknologi Mineral – LIPI).

2.3 Bentonit

Bentonit merupakan istilah untuk lempung yang terdiri atas mineral monmorilonit sebagai kandungan utamanya. Kandungan monmorilonit pada bentonit berkisar antara 70-80%. Bentonit sering disebut sebagai nama dagang dari monmorilonit. Selain monmorilonit, kandungan mineral yang terdapat dalam bentonit diantaranya mineral kaolinit, illit, kuarsa, plagioklas, kristobalit dan sebagainya (Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara, 2005). Bentonit adalah lempung dari golongan smektit yang memiliki rumus kimia $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Struktur atom monmorilonit terdiri dari lapisan oktahedral dari alumina yang diapit oleh lapisan tetrahedral silika. Pada lapisan tetrahedral terjadi substitusi isomorfik antara Si dengan Al, sedangkan pada Al dapat disubstitusikan oleh Fe atau Mg. Substitusi isomorfik yang terjadi pada lapisan tetrahedral maupun pada lapisan oktahedral menyebabkan monmorilonit relatif bermuatan negatif dan muatan dari monmorilonit ini akan distabilkan oleh kation yang terdapat di bagian interlayer. Bentuk bentonit dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Bentonit (Sumber: Laboratorium Non-Logam Balai Penelitian Teknologi Mineral – LIPI).

Bentonite dibagi menjadi dua berdasarkan tipenya, yaitu:

- a. Natrium bentonite (Na-bentonit swelling bentonit). Tipe bentonit ini memiliki daya mengembang hingga delapan kali apabila dicelupkan ke dalam air dan tetap terdispersi beberapa waktu di dalam air. Dalam keadaan kering bentonit berwarna putih, pada keadaan basah dan terkena sinar matahari akan berwarna mengkilap. Perbandingan soda dan kapur tinggi, suspensi koloidal mempunyai pH: 8,5-9,8, dan tidak dapat diaktifkan. Posisi pertukaran diduduki oleh ion-ion sodium (Na^+).
- b. Kalsium bentonite (Ca-bentonit non swelling bentonit). Tipe bentonit ini kurang mengembang saat dicelupkan ke dalam air dan terdispersi di dalam air, namun setelah diaktifkan mempunyai sifat yang baik. Perbandingan kandungan Na dan Ca rendah, suspensi koloidal memiliki pH: 4-7. Posisi pertukaran ion lebih banyak ion-ion kalsium dan magnesium. Dalam keadaan kering bentonite bersifat rapid slaking, berwarna abu-abu, kuning, merah dan coklat. Unsur-unsur kimia yang terkandung dalam bentonit dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Unsur-unsur kimia dalam bentonit

Komposisi kimia	Persentase massa (%)
SiO ₂	74,9
Al ₂ O ₃	13,45
Fe ₂ O ₃	2,18
CaO	0,23
MgO	0,98
K ₂ O	1,72
Air	4

Sumber: Supeno, 2007.

2.4 Alkali Aktivator

Aktivator merupakan unsur yang menyebabkan unsur lain saling bereaksi. Dalam penelitian ini, aktivator yang digunakan adalah campuran dari larutan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃). Natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur alumina dan silika yang terkandung dalam material sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat, sedangkan natrium silikat memiliki fungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi (Hardjito *et al.*, 2004 dalam Fitriani, 2010). Alkali aktivator adalah bahan kimia yang digunakan untuk mereaksikan kandungan silika dan alumina yang terdapat pada prekursor, sehingga dapat menghasilkan ikatan polimerisasi yang kuat dalam pembentukan mortar geopolimer.

Larutan natrium hidroksida (NaOH) dan larutan natrium silikat (Na₂SiO₃) adalah jenis alkali aktivator yang banyak digunakan dan mudah di dapatkan. Natrium silikat mempunyai 2 bentuk, yaitu larutan dan padatan.

2.4.1 Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium hidroksida merupakan senyawa anorganik berbentuk putih padat dan tersedia dalam bentuk pelet, serpihan, butiran ataupun larutan jenuh. Senyawa ini berfungsi untuk mereaksikan unsur Al dan Si yang terkandung didalam material geopolimer sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang lebih kuat. Kadar kemurnian yang dimiliki oleh natrium hidroksida adalah 98%. Natrium hidroksida membentuk larutan alkali yang kuat ketika dilarutkan ke dalam air. Pembuatan larutan NaOH dilakukan dengan cara melarutkan serpihan natrium hidroksida

dalam aquades. Banyaknya serpihan NaOH yang dilarutkan, tergantung molaritas yang digunakan. Bentuk serpihan atau pelet NaOH dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Serpihan NaOH (Dedlee, 2017).

Salah satu faktor yang mempengaruhi tingkat kemampuan kerja adalah molaritas NaOH (Nath *et al.*, 2015). Peningkatan molaritas menyebabkan tingginya disosiasi spesi aktif bahan baku yang menghasilkan jaringan gel geopolimer yang lebih banyak. Konsentrasi NaOH yang terlalu tinggi dapat mengganggu proses ikatan geopolimerisasi karena jumlah ion OH^- yang berlebih menyebabkan reaksi yang tidak efisien (Hamidi *et al.*, 2016).

2.4.2 Natrium Silikat (Na_2SiO_3)

Natrium silikat (Na_2SiO_3) disebut juga *waterglass* merupakan salah satu senyawa yang berperan dalam pembuatan mortar geopolimer karena berfungsi mempercepat reaksi polimerisasi. Senyawa ini berbentuk cairan kental yang tidak berwarna dan apabila dilarutkan dalam air menghasilkan larutan alkali (Arini *et al.*, 2013). Pengaruh penggunaan Na_2SiO_3 dalam mortar geopolimer dapat meningkatkan kemampuan kerja (*workability*) serta kuat tekan pada beton geopolimer. Natrium silikat (Na_2SiO_3) memiliki dua bentuk, yaitu padatan dan larutan. Pada campuran geopolimer lebih banyak digunakan dengan bentuk larutan. Bentuk natrium silikat dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Natrium silikat (Sumber: Laboratorium NonLogam Balai Penelitian Teknologi Mineral – LIPI).

Peningkatan jumlah Na_2SiO_3 mengakibatkan viskositas semakin tinggi dan proses pembentukan binder semakin cepat. Selain itu, peningkatan kandungan jumlah Na_2SiO_3 dalam campuran menyebabkan peningkatan jumlah SiO_2 yang mempengaruhi nilai kuat tekan yang dihasilkan (Sengkey *et al*, 2020).

2.5 Pengurang air kisaran tinggi

Pengurang air kisaran tinggi juga dikenal *superplasticizer* merupakan bahan tambah. Bahan tambah adalah bahan selain semen, agregat, dan air yang ditambahkan dalam campuran mortar. Penambahan bertujuan untuk mengurangi kebutuhan air dalam campuran mortar. Bahan campuran ini dapat mengurangi faktor air semen (FAS) yang dibutuhkan untuk mencapai mutu mortar yang diinginkan, mortar yang dihasilkan pun akan menjadi lebih encer dari beton yang dibuat tanpa *superplasticizer*. Bahan tambahan ini berfungsi untuk meminimalisir penggunaan air. Pengurangan air dalam campuran mortar dapat menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi dengan air yang sedikit tetapi *workability* tetap terjaga. Bahan tambah ini juga berfungsi mortar yang dihasilkan tidak terjadi pemisahan (segregasi/bleeding) dengan jumlah air besar dalam campuran (Utama dan Herbudiman, 2017). Bentuk *superplasticizer* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Superplasticizer (Sumber: Laboratorium Non-Logam Balai Penelitian Teknologi Mineral – LIPI).

Menurut ASTM C 494, *superplasticizer* adalah bahan kimia tambahan yang digunakan sebagai pengurang air yang sangat efektif. Dengan pemakaian bahan tambahan ini diperoleh adukan dengan kekentalan lebih encer dengan faktor air semen yang sama, sehingga kuat tekan lebih tinggi. Komposisi kimia yang terdapat pada *superplasticizer* dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Tabel kimia *superplasticizer*.

Golongan	Asal
Modified lignosulfonates (MLS)	Berasal dari proses netralisasi pengendapan, dan fermentasi dari cairan limbah yang diperoleh selama produksi pembuatan kertas dari kayu.
Sulfonated melamine-formaldehyde condensates (SMF)	Diproduksi oleh resinifikasi normal melamin – formaldehida.
Sulfonated naphthalene-formaldehyde condensates (SNF)	Dihasilkan dari naftalena dengan sulfonasi oleum atau SO_3 , reaksi selanjutnya dengan formaldehida menyebabkan polimerisasi dan asam sulfonat dinetralkan dengan natrium hidroksida atau kapur.
Polycarboxylate derivatives, misal jenis polycarbonix ether (PCE)	Mekanisme radikal bebas menggunakan inisiator peroksida digunakan untuk proses polimerisasi

Sumber: Rixom and Maivaganam, 2003.

2.6 Air

Pada campuran mortar geopolimer penggunaan air lebih sedikit dibandingkan mortar biasa. Takaran air yang terlalu banyak akan menyebabkan kurangnya kuat tekan mortar. Sedangkan takaran air yang terlalu sedikit akan membuat sulitnya proses pengadukan dan pencetakan (Fitri, 2016). Sehingga takaran air yang ditambahkan dalam campuran harus sesuai dengan perhitungan. Berdasarkan SNI 2847-2013, penggunaan air untuk campuran mortar sebaiknya memenuhi persyaratan sebagai berikut (Tjokrodimulyo, 2007):

- a. Air dengan pH normal = 7.
- b. Tidak mengandung senyawa-senyawa yang tercemar.
- c. Tidak mengandung ion klorida $> 0,5$ g/liter.
- d. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 g/liter.

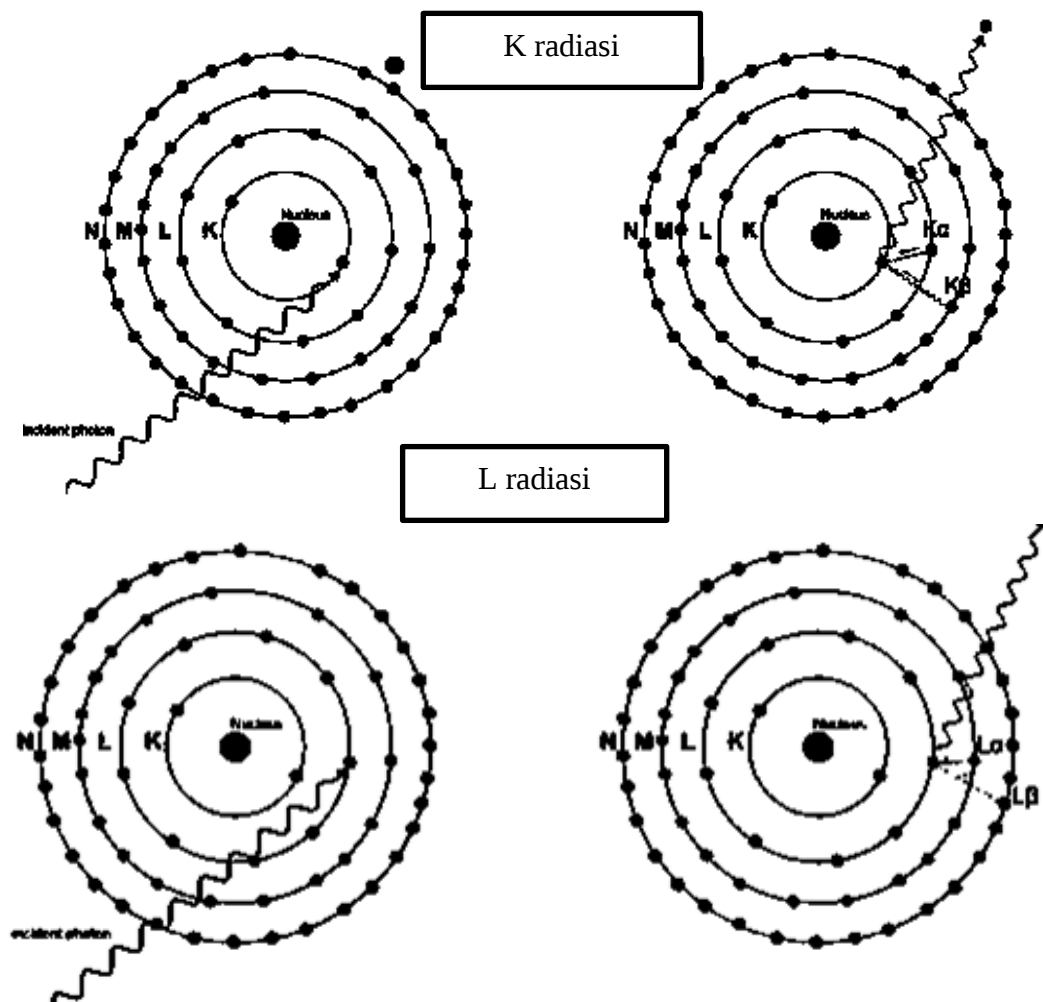
2.7 Karakterisasi Material

2.7.1 *X-Ray Fluorescence (XRF)*

XRF merupakan alat yang digunakan untuk menganalisis komposisi kimia dan konsentrasi unsur pada sampel padat, bubuk atau cair. Analisa dengan XRF diperoleh dengan menganalisis unsur penyusun sampel. Secara umum, XRF spektrometer mengukur panjang gelombang komponen material secara individu dari emisi fluoresensi yang dihasilkan sampel saat diradiasi oleh sinar-X (Solovyov, 2000). XRF adalah salah satu metode analisis yang tidak merusak sampel dan dapat digunakan untuk analisis unsur dalam bahan secara kualitas dan kuantitas. Hasil analisis kualitatif ditunjukkan oleh puncak spektrum yang mewakili jenis unsur sesuai dengan energi sinar-X karakteristiknya, sedangkan analisis kuantitatif diperoleh dengan cara membandingkan intensitas sampel dengan standar.

Analisis menggunakan XRF dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan sinar-x karakteristik yang terjadi dari peristiwa efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi karena elektron dalam atom target (sampel) terkena sinar berenergi tinggi (radiasi gamma, sinar-X). Bila energi sinar tersebut lebih tinggi daripada energi ikat elektron dalam orbit K, L atau M atom target, maka elektron atom target akan keluar dari orbitnya. Dengan demikian atom target akan mengalami kekosongan elektron.

Kekosongan elektron ini akan diisi oleh elektron dari orbital yang lebih luar diikuti pelepasan energi yang berupa sinar-x. Jika elektron kulit yang diganti adalah elektron kulit K maka emisi sinar-X dikenal sebagai sinar-X deret K. Demikian juga, transisi kulit L menghasilkan sinar-X deret L. Garis-garis spektrum sinar-X dikelompokkan secara seri (K, L, M). Garis yang berada dalam rangkaian hasil transisi elektron dari berbagai tingkatan ke kulit yang sama. Contohnya transisi dari kulit L dan M ke kulit K akan menyediakan garis spektral yang disebut $K\alpha$ dan $K\beta$. Spektrum sinar-X dihasilkan oleh semua elemen dalam sampel. Setiap elemen akan memiliki banyak garis dalam spektrum, karena sinar-X akan dipancarkan untuk setiap jenis orbital. Prinsip kerja XRF dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Prinsip kerja XRF (Bertin, 1975).

Prinsip kerja XRF yaitu apabila terjadi eksitasi sinar-X primer yang berasal dari tabung X-ray mengenai sampel, sinar-X dapat diabsorpsi atau dihamburkan oleh material. Proses dimana sinar-X diabsorpsi oleh atom dengan mentransfer energinya pada elektron yang terdapat pada kulit yang lebih dalam disebut efek fotolistrik. Selama proses ini, bila sinar-X primer memiliki cukup energi, elektron pindah dari kulit yang di dalam menimbulkan kekosongan. Kekosongan ini menghasilkan keadaan atom yang tidak stabil. Apabila atom kembali pada keadaan stabil, elektron dari kulit luar pindah ke kulit yang lebih dalam dan proses ini menghasilkan energi sinar-X yang tertentu dan berbeda antara dua energi ikatan pada kulit tersebut. Emisi sinar-X dihasilkan dari proses yang disebut XRF. Proses deteksi dan analisa emisi sinar-X disebut analisa XRF. Pada umumnya kulit K dan L terlibat pada deteksi XRF. Sehingga sering terdapat istilah $K\alpha$ dan $K\beta$ serta $L\alpha$ dan $L\beta$ pada XRF. Jenis spektrum X-ray dari sampel yang diradiasi akan menggambarkan puncak-puncak pada intensitas yang berbeda. Hasil analisa XRF terhadap material abu dasar dalam penelitian (Prasandha dkk, 2015) dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Hasil XRF abu dasar

Senyawa	%
SiO_2	39,96
Al_2O_3	44,56
Fe_2O_3	2,34
CaO	1,67
MgO	5,04
Na_2O	0,46
K_2O	0,26
P_2O_5	1,11

Sumber: Prasandha dkk, 2015.

2.7.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menggambarkan bentuk permukaan dari material yang dianalisis. SEM mempunyai keunggulan dalam proses yaitu berawal dari kemudahan dalam penyiapan sampel sehingga dapat menghasilkan beragam sinyal karena interaksi antara berkas elektron dengan sampel, dimana dari proses tersebut menghasilkan

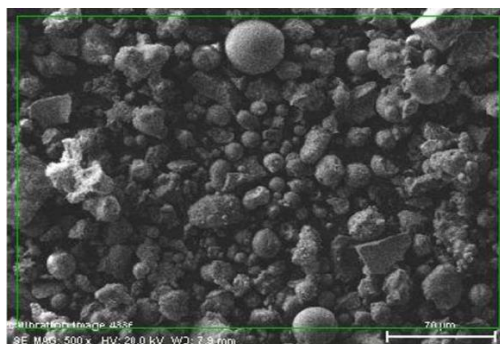
beragam tampilan data dari permukaan lapisan. Informasi yang diberikan dari hasil SEM yaitu berupa topologi, morfologi, komposisi, dan informasi mengenai kekristalan suatu bahan (Goldstein et al., 1981).

Prinsip kerja SEM yaitu sumber elektron yang berasal dari filamen katoda ditembakkan menuju sampel. Berkas elektron tersebut kemudian difokuskan oleh lensa magnetik sebelum sampai pada permukaan sampel. Lensa magnetik memiliki lensa kondenser yang berfungsi memfokuskan sinar elektron. Berkas elektron kemudian menghasilkan *backscattered electron* (BSE) dan *secondary electron* (SE) menuju sampel, dimana SE akan terhubung dengan ampliflier yang kemudian dihasilkan gambar pada monitor (Reed, 1993). Alat kerja SEM dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Alat SEM (Sumber: Laboratorium Mineral - BRIN).

Berikut contoh hasil dari SEM abu dasar sebagai salah satu bahan yang digunakan dalam geopolimer dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Hasil uji SEM geopolimer abu dasar (Kurniasari, 2017).

2.8 Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan sifat kemampuan menahan atau memikul suatu beban tekan maksimum (Irawati, 2015). Kuat tekan digunakan sebagai parameter untuk menentukan mutu dan kualitas beton atau mortar yang ditentukan oleh perbandingan agregat, semen, air, dan berbagai jenis bahan tambahan. Nilai kuat tekan dapat dilakukan dengan menggunakan alat uji tekan dengan cara memberikan beban bertingkat terhadap benda uji berbentuk kubus sampai retak atau hancur. Berdasarkan SNI-03-6825-2002 kuat tekan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (2.2)$$

Dengan: $f'c$ = kuat tekan (MPa atau kg/cm^2)

P = beban (kg)

A = luas permukaan (cm^2)

2.9 Massa Jenis

Massa suatu benda adalah ukuran banyak zat yang terkandung dalam suatu benda. Sedangkan massa jenis adalah besaran yang menunjukkan perbandingan antara massa dengan volume suatu benda, sebagaimana yang dikemukakan bahwa “massa jenis suatu benda adalah massa benda dibagi dengan volumenya” (Tipler, 1996). Persamaan yang digunakan untuk menghitung massa jenis yaitu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

dengan ρ = massa jenis (g/cm^3)

m = massa (g)

V = volume (cm^3)

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Agustus 2021 sampai dengan September 2021 di Laboratorium Analisis Kimia Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya ayakan *mesh* 20 dan 325, tumbukan besi, oven merk sharp, timbangan digital merk YaHongLtd, sendok pengaduk, gelas ukur 10 ml, labu *erlenmeyer* 1000 ml, cetakan kubus ukuran (5 x 5 x 5) cm³, sendok perata, wadah pengaduk, sarung tangan, masker, alu, mesin uji kuat tekan dengan alat UTM HT-2402, mesin uji XRF dengan alat *PanAlytical Epsilon 3 XLE* Buatan Netherland, mesin uji SEM dengan alat *Thermo Scientific Quattro* Netherland perbesaran sampai 2.000.000 x dilengkapi dengan SE dan BSE detector.

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya abu dasar dari Tarahan Lampung Selatan, bentonit dari Jawa Tengah, natrium hidroksida (NaOH) jenis teknis dari Banten, natrium silikat (Na₂SiO₃) merk Bratachem dari Bandung, *superplasticizer* dari PT. Multi Eraguna Usaha Indonesia, air dari Tanjung Bintang Lampung Selatan, dan aquades.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

3.3.1 Preparasi Sampel

1. Preparasi Larutan NaOH

Langkah-langkah pembuatan larutan NaOH dengan variasi konsentrasi 6, 8, dan 10 M yaitu sebagai berikut:

a. Menghitung kebutuhan NaOH menggunakan persamaan berikut:

Ar : Na = 23, O = 16, H = 1

Mr NaOH = 23 + 16 + 1

= 40

$$M = \frac{m}{Mr} \times \frac{1000}{V} \quad (3.1)$$

dengan M = molaritas zat (molar)

m = massa relatif suatu zat (g)

Mr = massa molekul relatif suatu zat (g/mol)

V = volume larutan (ml)

Contoh perhitungan pada konsentrasi 6 M sesuai rumus 3.1

$$M = \frac{m}{Mr} \times \frac{1000}{V}$$

$$6 = \frac{m}{40} \times \frac{1000}{1000}$$

$$m = 6 \times 40$$

$$m = 240 \text{ g}$$

Setelah dihitung menggunakan persamaan 3.1. diperoleh massa untuk setiap konsentrasi 6, 8, dan 10 M sebanyak 240, 320, dan 400 g.

- b. Menimbang NaOH sebanyak 240, 320, dan 400 g.
- c. Memasukkan NaOH yang telah ditimbang sesuai variasi konsentrasi 6, 8, dan 10 M ke dalam labu ukur dengan kapasitas 1000 ml.
- d. Menambahkan *aquades* ke dalam labu ukur sampai volumenya 1 liter.
- e. Mendinginkan larutan NaOH selama 24 jam.

2. Preparasi larutan NaOH, Na₂SiO₃, *superplasticizer* dan air

Memasukan larutan NaOH dengan variasi 6, 8, dan 10 M lalu menambahkan Na₂SiO₃, *superplasticizer* dan air sesuai komposisi ke dalam wadah kemudian diaduk.

Komposisi bahan mortar geopolimer dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Variasi komposisi mortar geopolimer.

Bahan	A1(%)	A2(%)	A3(%)	A4(%)	A5(%)
Abu dasar	51,41	46,41	41,41	36,41	31,41
Bentonit	33,71	38,71	43,71	48,71	53,71
NaOH	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
Na ₂ SiO ₃	7,66	7,66	7,66	7,66	7,66
<i>Superplasticizer</i>	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Air	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70

3.3.2 Pencetakan Sampel

Langkah-langkah pencetakan sampel mortar geopolimer yaitu sebagai berikut:

1. Menimbang abu dasar dan bentonit sesuai variasi komposisi ke dalam wadah kemudian diaduk.
2. Menambahkan larutan NaOH dengan variasi konsentrasi 6, 8, dan 10 M lalu mencampurkan Na₂SiO₃, pengurang air kisaran tinggi dan air ke dalam wadah sambil diaduk hingga homogen dan terbentuk adonan.
3. Memasukkan adonan ke dalam cetakan kubus ukuran $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$.
4. Memadatkan dengan menggunakan tumbukan besi ke dalam cetakan.
5. Meratakan permukaan dengan menggunakan sendok perata.
6. Memberi kode pada sampel sesuai variasi konsentrasi 6, 8, dan 10 M.
7. Membiarkan sampel selama 24 jam.
8. Melepaskan mortar geopolimer dari cetakan kubus ukuran $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$.
9. Memanaskan mortar geopolimer dalam oven dengan variasi suhu 60 dan 80°C selama 8 jam.

3.3.3 Pengujian Sampel

1. Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan pada sampel dilakukan untuk mendapatkan besarnya beban tekan maksimum yang bisa diterima oleh sampel. Prosedur pengujian kuat tekan sesuai dengan SNI 03-2493-1991 yaitu sebagai berikut:

- a. Menyiapkan sampel.
- b. Meletakkan sampel simetris dengan mesin uji kuat tekan.
- c. Melihat sampel pada alat uji kuat tekan apabila sudah hancur dan *dial* tidak naik lagi kemudian mencatat beban tekan maksimum yang bisa diterima benda uji (P).
- d. Menghitung kuat tekan menggunakan persamaan (2.2).

2. Massa Jenis

Pengujian massa jenis pada sampel dilakukan dengan cara mengukur massa dengan neraca dan mencari volume dengan menggunakan gelas ukur. kemudian menghitung massa jenis dengan membagi massa dan volume benda.

Langkah-langkah pengujian massa jenis yaitu sebagai berikut:

- a. Mengayak sampel mortar geopolimer yang sudah hancur menggunakan ayakan lolos mesh 20.
- b. Menimbang sampel mortar geopolimer yang telah diayak sebanyak 3-5 g.
- c. Menyiapkan gelas ukur 10 ml lalu diisi aquades sebanyak 6 ml.
- d. Memasukkan sampel mortar geopolimer kedalam gelas ukur.
- e. Melihat dan mencatat kenaikan volume pada gelas ukur yang terisi aquades dan sampel mortar geopolimer.
- f. Menghitung nilai massa jenis menggunakan persamaan (2.3).

3.3.4 Karakterisasi Sampel

Langkah-Langkah pembuatan karakterisasi sampel untuk diuji yaitu sebagai berikut:

1. Menghaluskan sampel mortar geopolimer menggunakan tumbukan besi.
2. Mengayak sampel mortar geopolimer yang telah halus menggunakan ayakan mesh 325 sebanyak 5-10 g.

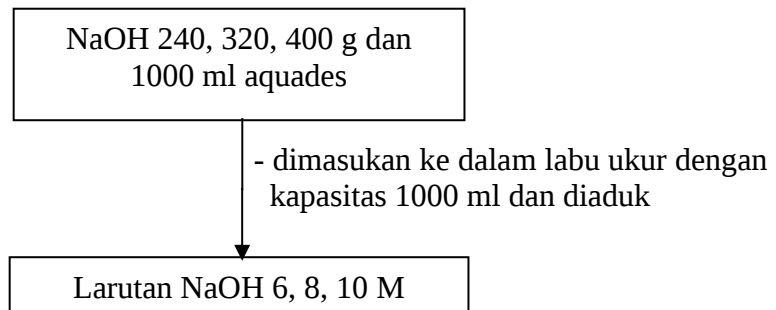
3. Sampel yang telah diayak lolos mesh 325 kemudian dikarakterisasi menggunakan alat uji XRF dan SEM.

3.4 Diagram Alir

Secara garis besar, tahapan yang dilakukan pada penelitian ini disajikan dalam diagram alir sebagai berikut.

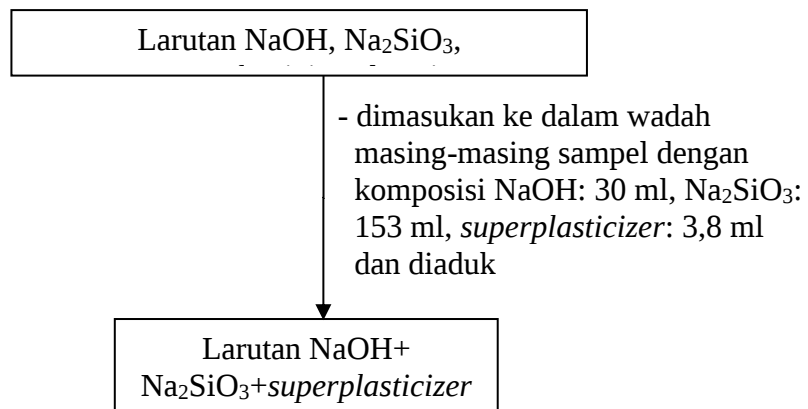
3.4.1 Preparasi sampel

1. Diagram alir preparasi larutan NaOH disajikan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir preparasi larutan NaOH.

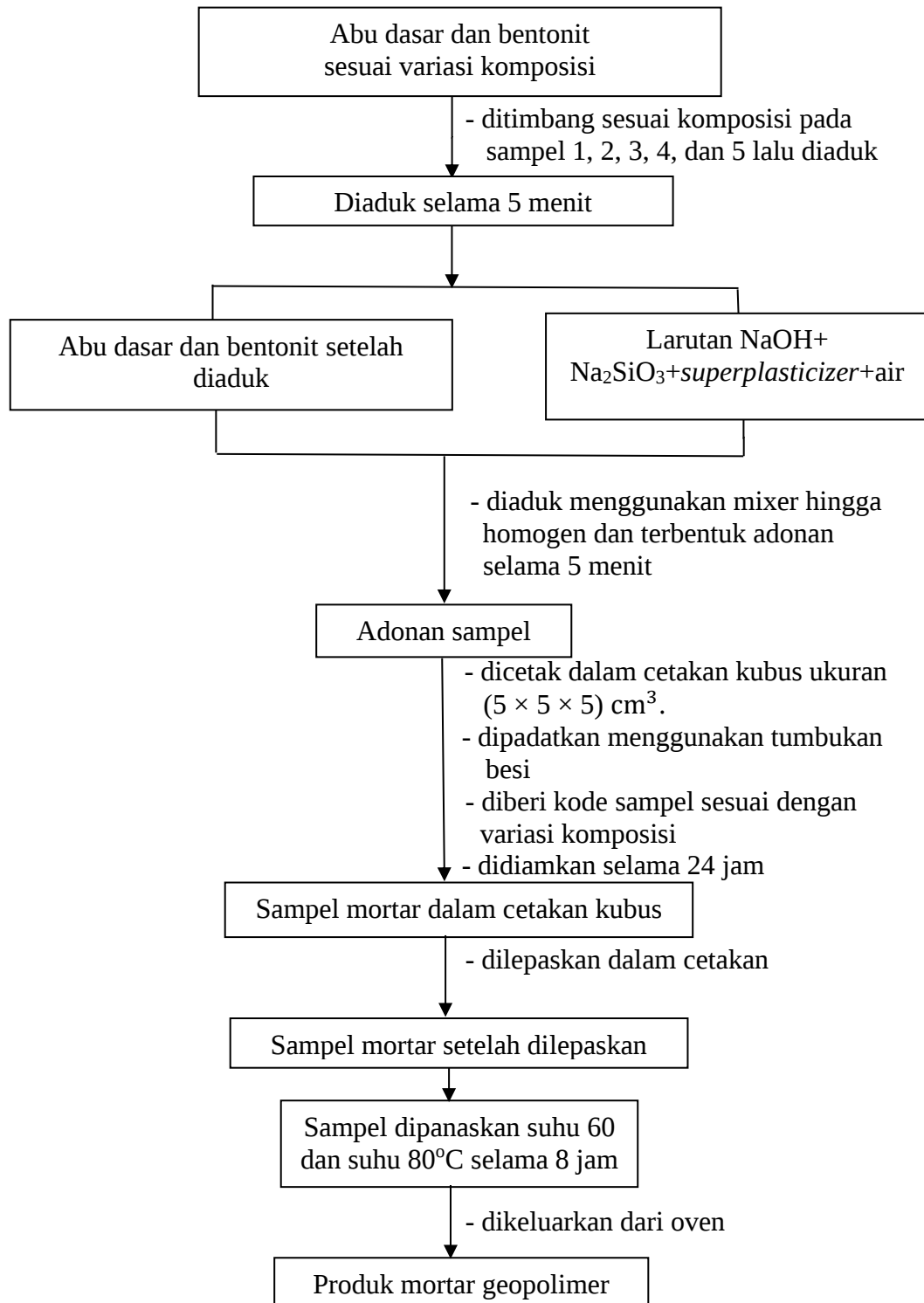
2. Diagram alir preparasi larutan NaOH, Na_2SiO_3 , *superplasticizer* dan air disajikan dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram alir preparasi larutan sampel.

3.4.2 Pembuatan Sampel

Diagram alir pembuatan sampel disajikan dalam Gambar 3.3.

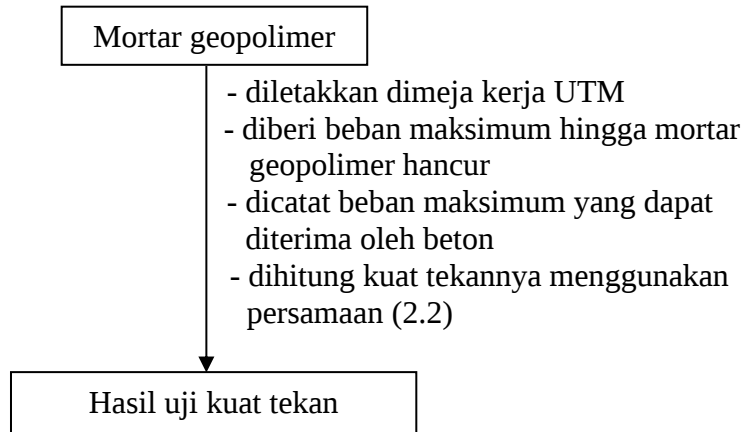


Gambar 3.3. Diagram alir pembuatan sampel.

3.4.3 Pengujian Sampel

1. Uji kuat tekan

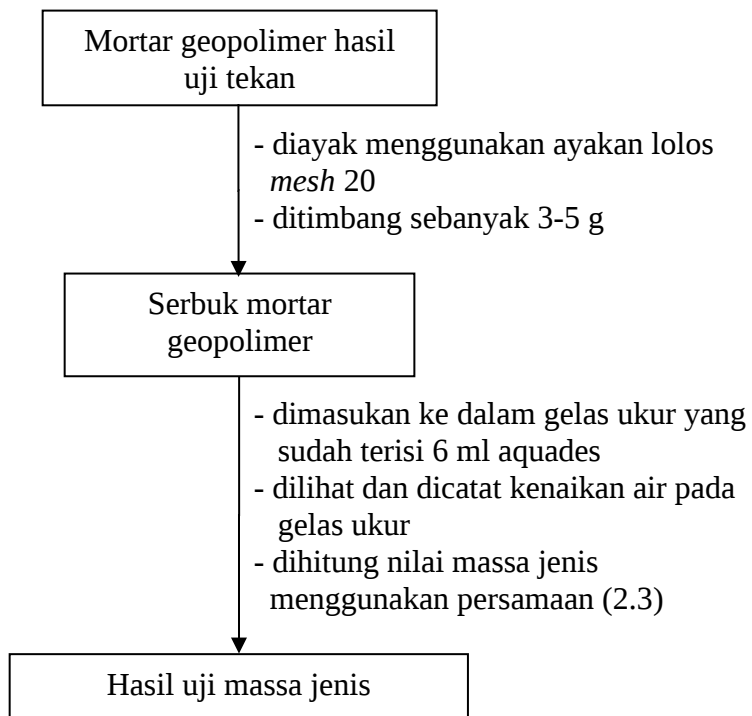
Diagram alir pengujian kuat tekan disajikan dalam Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram alir uji kuat tekan.

2. Uji massa Jenis

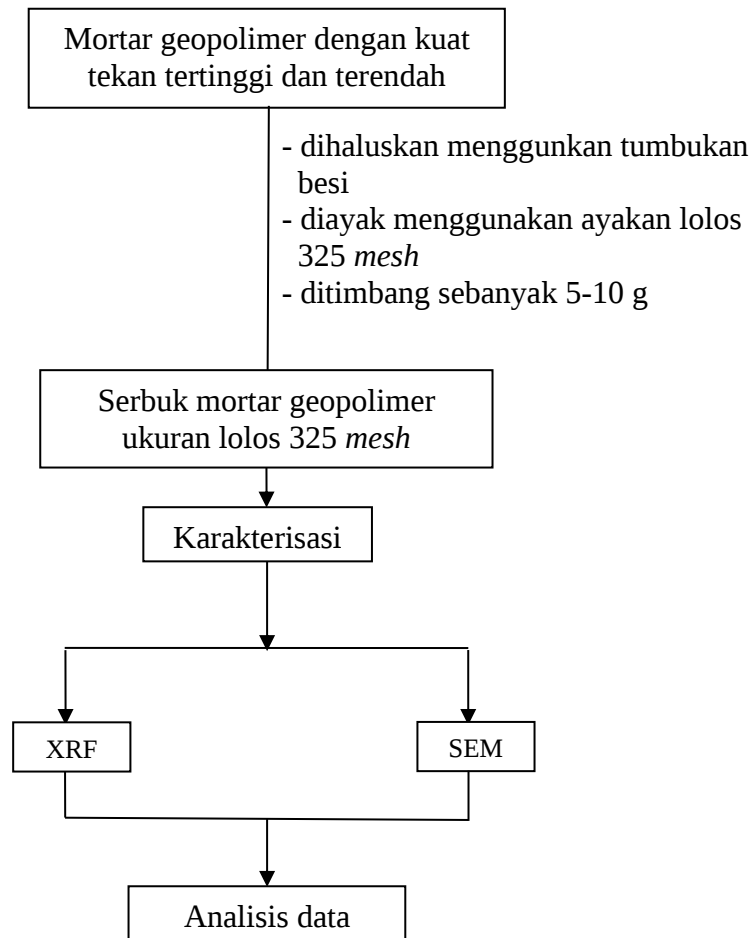
Diagram alir pengujian massa jenis disajikan dalam Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Diagram alir uji massa jenis.

3.4.4 Karakterisasi XRF dan SEM

Diagram alir karakterisasi XRF dan SEM disajikan dalam Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Diagram alir karakterisasi XRF dan SEM.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil uji kuat tekan mortar geopolimer pada sampel A1, A2, A3, A4, dan A5 dengan molaritas 6, 8, 10 M yang dilakukan *curing* pada suhu 60 dan 80°C selama 8 jam memperoleh nilai kuat tekan tertinggi pada sampel A2 dengan molaritas 10 M yaitu sebesar 58,20 dan 60,48 kg/cm².
2. Hasil uji massa jenis mortar geopolimer pada sampel A1, A2, A3, A4, dan A5 dengan molaritas 6, 8, 10 M yang dilakukan *curing* pada suhu 60 dan 80°C selama 8 jam memperoleh nilai massa jenis tertinggi pada sampel A2 dengan molaritas 10 M yaitu sebesar 5,00 dan 5,55 g/cm³.
3. Hasil karakterisasi XRF pada abu dasar dan bentonit menunjukkan bahwa SiO₂ memiliki persentase sebesar 50,12 dan 65,2%.
4. Hasil karakterisasi XRF pada mortar geopolimer menunjukkan bahwa sampel A2 dengan molaritas 6 M dan sampel A4 dengan molaritas 10 M didominasi oleh senyawa SiO₂ yaitu sebesar 64,481 dan 64,719%.
5. Hasil karakterisasi SEM pada mortar geopolimer sampel A4 dengan molaritas 6 M menunjukkan bahwa morfologi permukaan sedikit rata dan pori-pori yang semakin besar sedangkan sampel A2 dengan molaritas 10 M menunjukkan morfologi permukaan lebih merata dan pori-pori semakin kecil.

5.2. Saran

Saran dalam penelitian ini yaitu untuk memperoleh geopolimer dengan kualitas yang baik perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan bahan dasar lainnya seperti abu terbang, abu sekam padi, abu kokas, kaolin, basalt, dan lain sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Salem, H. A. 2016. Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance. *Journal Construction and Building Materials* 121. 694–703.
- Abdullah, M.M.A.B., *et al.* 2012. Fly Ash-based Geopolymer Lightweight Concrete Using Foaming Agent. *International Journal of Molecular Sciences*. pp. 7186–7198.
- Aprizal, E. J. 2015. Pengaruh Partial Replacement Semen Portland dengan Bentonite Terhadap Kuat Tekan Beton Berdasarkan Variasi Umur. *Inersia*. Vol. XI. No. 1. 67-68.
- Arini, R.N., Triwulan dan J.J. Ekaputri. 2013. Pasta Ringan Geopolimer Berbahan Dasar Lumpur Bakar Sidoarjo dan Fly Ash Perbandingan 3:1 dengan Tambahan Powder dan Serat Alam. *Jurnal Teknik Pomits*. Vol. 1. No. 1. 1-5. Surabaya.
- ASTM C 618-03. *Standard Specification for Pozzoland and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. United States: AST.
- ASTM C-494. 1992. *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International.
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. SNI 03- 6825-2002: *Metode Pengujian Kuat Tekan Mortar Semen Portland untuk Pekerjaan Sipil*.
- Bertin, E.P. 1975. *Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis*, 2nd Edition. Plenum Press. New York.
- Budh, C.D., N. R Warhade. 2014. “Effect of Molarity on Compressive Strength of Geopolymer Mortar.”. *International Journal of Civil Engineering*.
- Darma Adi S. F. R. 2018. Studi Experimental pengaruh Perbedaan Molaritas Aktivator pada Perilaku Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash. *Jurnal Karya Teknik Sipil*. Vol. 7. No. 1. 89-98.

Davidovits, J. 1991. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. Journal of Thermal Analysis. France. 1633-1656. Davidovits, J. 2013. *Geopolymer Cement*. Institut Geopolymere. France.

Dedlee, 2017. <https://dedlee30.blogspot.com/2017/04/soda-apinatriumhidroksida-naoh.html>. Diakses pada tanggal 18 Oktober 2021.

Ekaputri, J. J., & Triwulan, T. 2013. Sodium sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil ITB*. 1-10.

Fitri, J. 2016. Perancangan Mortar Geopolimer Abu Sekam. *Jurnal Fakultas Teknik*. Universitas Riau. Vol. 3. No. 2. 1-8.

Gandina, N. L., Y.Djoko, S. 2020. Studi Eksperimental Beton Geopolimer dengan Memanfaatkan Fly Ash sebagai Pengganti Semen dan Serat Mat sebagai Aditif. *Civil Engineering Research Journal*. Teknik Sipil. Universitas Komputer Indonesia. Vol. 1. No. 1. 26-36.

Gao, X., Yuan, B., Yu, Q. L., Yuan, B., & Yu, Q. L. 2017. *Accepted Manuscript*.

Goldstein, J., Newbury, D.E., Echlin, P., Joy, D.C., Fiori, C., Lifshin, E. 1981. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. A Text for Biologists, Materials Scientists, and Geologists.

Goh, C., Show, K., Cheong, H. 2003. Municipal Solid Waste Fly Ash as a Blended Cement Material. *Materials in Civil Engineering*. 513-523.

Hamidi, R. M., Man, Z., & Azizli, K. A. 2016. Concentration of NaOH and The Effect on The Properties of Fly Ash Based Geopolymer. *Procedia Engineering*. 189-193.

Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D. M. J., Rangan, B.V. 2005. Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Australian Journal of Structural Engineering*. Australia. Vol. 6 No. 1. 88-93.

Ibrahim, W.M.W., *et al.* 2017. Effects of Sodium Hydroxide (NaOH) solution Concentration on Fly Ash-Based Lightweight Geopolymer. *AIP Conference Proceedings*. pp. 020011–1–020011–8.

Irawati, N., Putri, N.T., dan Alexie, H. 2015. Strategi Perencanaan Jumlah Material Tambahan dalam Memproduksi Semen dengan Pendekatan Taguchi untuk Meminimalkan Biaya Produksi (Study Kasus PT Semen Padang). *Jurnal Optimasi Sistem Industri*. Vol. 14. No. 1. 159-172.

Jesus, S., Maria, C., Farinha, C.B., Brito, J. and Vega, R. 2019. Rendering Mortars with Incorporation of Very Fine Agregates from Contruction and Demolition Waste. *Construction and Building Materials*. Vol. 229. No. 1. Pp 116844.

- Kurniasari, P.T. 2017. Pemanfaatan Penggunaan Fly Ash dan Bottom Ash sebagai Pozzolan pada Binder Geopolymer. *Skripsi*. Jurusan Bangunan Gedung. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya. 131-132.
- Murali, B., Vijaya Ramnath, B., & Chandramohan, D. 2017. Crash Test Analysis on Natural Fiber Composite Materials for Head Gear. *Indian Journal of Science and Technology*. 1–5.
- Nath, P., P.K. Sarker. 2015. *Use of OPC to Improve Setting and Early Strength Properties of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete Cured at Room Temperature*. Cem. Concr. Compos. 205–214. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.08.008.
- Prasandha, A. F. E., Triwulan, dan Januarti, J. E. 2015. Paving Geopolimer Berbahan Dasar Bottom Ash dan Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA). *Jurnal Teknik ITS*. 110-115.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara. 2005. <http://www.tekmira.esdm.go.id/data/Bentonit/ulasan.asp?xdir=Bentonit&commId=8&comm=Bentonit>. Pada 21 April 2015.
- Putra, A. K., Steenie, G. W., & Dapas, S. O. 2014. Kuat Tarik Belah Beton Geopolymer Berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*. Universitas Sam Ratulangi Manado. 330-336.
- Rafieizonooz, Mahdi., Mirza, Jahangir, *et al.*, 2016. Investigation of Coal Bottom Ash and Fly Ash in Concrete as Replacement for Sand and Cement. *Journal Construction and Building Materials*. 15-24.
- Rajendran, M dan Nagan, S. 2015. *Geopolymer Ferrocement Panels Under Flexural Loading*. Sci Eng Compos Mater. 331–341.
- Reed, SJB. 1993. *Electron Microprobe Analysis*. 2nd edn. Cambridge Univ. Press, Cambridge Google Scholar.
- Rixom, R., & Mailvaganam, N. 1999. *Chemical Admixtures for Concrete Third Edition*. London: E & FN Spon.
- Rofikatul Karimah dan Akbar Prasajo. 2019. Pembuatan Beton Porous dengan Material Geopolimer. *Jurnal Media Teknik Sipil*. 64-69.
- Rohma, F. 2020. Pembuatan Paving Block Berbahan dasar Limbah Plastik Polyethylene, Bottom Ash Hasil Insenerasi dan Bahan Tambahan Pasir. *Skripsi*. Universitas Negeri Semarang. 49-50.
- Ruga, S., dan Siti, A., Z. 2021. Karakteristik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dan Bottom Ash. *Jurnal Teknik Sipil*. Politeknik Negeri Ujung Pandang Makassar. 66-71.

- Santosa, B., dan Barata. 2020. Pengaruh Penggantian Sebagian Semen dengan Bentonit Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Rancang Bangun Teknik Sipil*. Vol. 6. No. 1. 1-63.
- Sathonsaowaphak, A., Chnidaprasirt, P., Pimraksa, K. 2009. Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar. *J of Hazardous Mater.* 44-50.
- Sengkey, S. L., Irmawaty, R., Hustim, M., & Purwanto. 2020. Pengaruh Alkali Aktivator Terhadap Workabilitas dan Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Fly Ash Klas C. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil*. Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta. 101–108.
- Setiawan, A. 2020. Karakterisasi Bottom Ash sebagai Bahan Baku Katalis Zeolit dalam Sintesis Biodiesel. *Jurnal Teknologi Maritim*. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Vol. 3. No. 1.
- Singh, B., G, I., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. 2015. Geopolymer concrete : A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*. 78–90.
- Singh, M., and Siddique, R. 2015. Properties of Concrete Containing High Volume of Coal Bottom Ash Fine Aggregate. *Journal of Cleaner Production*. 269-278.
- Steenie E. Wallah, Servie O, Dapas. 2014. Kuat Tarik Belah Beton Geopolymer Berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*. Vol. 2. No.7. 33-36.
- SNI 03-1974-1990. 1990. *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional. 1-15.
- SNI 03-6825-2002. 2002. *Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland untuk Pekerjaan Sipil*. 4-5.
- SNI 7974-2013. 2013. *Spesifikasi Air Pencampur yang digunakan dalam Produksi Beton Semen Hidraulis*. 2-3.
- Solovyov, L. 2009. *X-Ray Fluorescence*. Panalytical B.V.
- Suarnita, I. W. 2012. Pemanfaatan Abu Dasar (Bottom Ash) sebagai Pengganti Sebagian Agregat Halus. 65-73.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S., & Shen, S. L. 2013. Strength Development in Clay-Fly Ash Geopolymer. *Construction and Building Materials*. 566–574.

- Sulistio, Aldi., Samuel Wahjudi., Djwantoro Hardjito dan Antoni. 2016. Penggunaan Bottom Ash sebagai Pengganti Agregat Halus Pada Mortar. Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya HVFA. Hal 1-8.
- Susanti. 2015. Pengembangan Geopolimer Berbasis Abu Terbang (Fly Ash) untuk Aplikasi Beton Ringan Ramah Lingkungan (Green Light Concrete). *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIX HFI*. Yogyakarta. 280-283.
- Susanto, T. E. 2016. Semen Geopolimer. PT. Semen Indonesia (persero), Tbk.
- Supeno, M. 2007. Bentonit Alam Terpillar sebagai Material Katalis CO-Katalis/ CO-Katalis Pembuatan Gas Hidrogen dan Oksigen dari Air. *Disertasi*. Universitas Sumatera Utara.
- Titi, D. S., & Arie Wardhono. 2016. Pengaruh Penambahan Slag terhadap Waktu Pengikatan Awal, Workability, dan Kuat Tekan Pada Pembuatan Beton Geopolymer Pada Temperature Normal. *Rekayasa Teknik Sipil*. Vol. 2.53-61.
- Tjokrodimulyo, K. 1996. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kuat Tekan Beton. *Teknologi Beton*. Yogyakarta. Tosima Sipil. 1-160.
- Tokede, B. B. P. 2018. Pengaruh Penggunaan Bottom Ash Batubara dan Limbah Karbit sebagai Substitusi Pada Campuran Paving Block. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*. Universitas Negeri Surabaya. Vol. 1. No. 1. 40-48.
- Triandini, Ira, J., & Wardhono, A. 2018. Pengaruh Kepekatan Larutan Aktivator terhadap Kuat Tekan Geopolymer Mortar Berbahan Dasar Abu Terbang dan NaOH 12 Molar Pada Kondisi Ss/Sh 1.0 dan 3.0. *Jurnal Mahasiswa Universitas Surabaya*. Hal. 1-13.
- Utami, R., Herbudiman, B., & Irawan, R. R. 2017. Efek Tipe Superplasticizer terhadap Sifat Beton Segar dan Beton Keras Pada Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash. *Jurnal Online Insitut Teknologi Nasional*. Vol. 3. 1-12.
- Wijaya, M. A. B., B. B. Adhitia., A. Costa. 2022. Analisis Kekuatan Tekan dan Permeabilitas Pervious Geopolymer Concrete dengan Variasi Rasio Alkali Aktivator terhadap Fly Ash. *Seminar Nasional*. Teknik Sipil. Universitas Sriwijaya.
- Wijaya, M. F., Monita, O., dan Edy, S. 2019. Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang Hybrid Menggunakan Semen Portland. *Jurnal Teknik*. Univeritas Riau. Vol. 13. No. 1. 61-69.
- Yanuari, R., Muhammad, I., Dinda, S. 2020. Studi Parametrik Mortar Geopolimer Hybrid Abu Sawit. *Jurnal Rekayasa Sipil*. Universitas Riau. Vol. 14. No. 2. 83-161.

Yasin, A. K. 2017. Rekayasa Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash. Program Studi Diploma Empat Lanjut Jenjang Teknik Sipil. Institut Teknologi Sepuluh November. 99-102.

Yuwono, L. S. 2017. Pengaruh Suhu Perawatan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang dengan Molaritas 8 M dan 10 M. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*. Universitas Negeri Surabaya. Vol. 03. 63-69.

