

**PENGARUH VARIASI SUHU DAN WAKTU TERHADAP SIFAT
MEKANIS, SIFAT FISIS DAN KARAKTERISTIK GEOPOLIMER
BERBAHAN *FLYASH* DAN *SLAG BOILER***

(Skripsi)

Oleh

**PUTRI RAMADHANI ARUM SARI
NPM 1917041060**



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

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI SUHU DAN WAKTU TERHADAP SIFAT MEKANIS, SIFAT FISIS DAN KARAKTERISTIK GEOPOLIMER BERBAHAN *FLY ASH* DAN *SLAG BOILER*

Oleh

PUTRI RAMADHANI ARUM SARI

Geopolimer merupakan material anorganik yang tersusun dari Si dan Al sehingga dapat digunakan sebagai alternatif pengganti semen melalui reaksi polimerisasi. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa suhu dan waktu pemanasan dapat berpengaruh terhadap sifat mekanis, sifat fisis dan karakteristik geopolimer. Pada penelitian ini digunakan variasi suhu yaitu 40°C, 60°C, 80°C dan 100°C dengan waktu pemanasan 6, 10 dan 14 jam. Geopolimer yang digunakan yaitu mortar geopolimer berukuran 5×5×5 cm³, berbahan *fly ash*, *slag boiler*, NaOH molaritas 10M, Na₂SiO₃ dan air. Pengujian sampel terdiri dari uji kuat tekan, uji absorpsi, uji porositas dan uji densitas. Sampel dikarakterisasi menggunakan alat XRF dan SEM-EDS. Sampel terbaik diperoleh pada suhu 80°C selama 14 jam dengan nilai kuat tekan 22,80 MPa, absorpsi sebesar 5,80%, porositas sebesar 19,73% dan densitas 3,40 g/cm³. Hasil karakterisasi sampel menggunakan XRF yaitu senyawa SiO₂ sebesar 52,129%, CaO sebesar 12,936%, Al₂O₃ sebesar 12,234% dan Fe₂O₃ sebesar 10,516%. Hasil karakterisasi sampel menggunakan SEM-EDS didominasi unsur O sebesar 47,98%, C sebesar 37,47%, Si sebesar 6,90% dan Al sebesar 3,63%. Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa variasi suhu dan waktu pemanasan berpengaruh terhadap sifat mekanis, fisis dan karakteristik geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*.

Kata Kunci: geopolimer, pemanasan, *fly ash*, *slag boiler*, karakterisasi

ABSTRACT

EFFECT OF TEMPERATURE AND TIME VARIATIONS ON MECHANICAL PROPERTIES, PHYSICAL PROPERTIES AND GEOPOLYMER CHARACTERISTICS MADE FROM FLY ASH AND BOILER SLAG

By

PUTRI RAMADHANI ARUM SARI

Geopolymers are inorganic materials composed of Si and Al that can be used as an alternative to cement through polymerization reactions. Some researchers have shown that heating temperature and time can affect the mechanical properties, physical properties and characteristics of geopolymers. In this study, temperature variations of 40°C, 60°C, 80°C and 100°C with heating times of 6, 10 and 14 hours were used. The geopolymer used is a 5×5×5 cm³ geopolymer mortar made from fly ash, boiler slag, NaOH molarity 10M, and water. Sample testing consisted of compressive strength test, absorption test, porosity test and density test. The samples were characterized using XRF and SEM-EDS. The best sample was obtained at 80°C for 14 hours with a compressive strength of 22.80 MPa, absorption of 5.80%, porosity of 19.73% and density of 3.40 g/cm³. The results of sample characterization using XRF are compounds SiO₂ of 52.129%, CaO of 12.936%, Al₂O₃ of 12.234% and Fe₂O₃ of 10.516%. The results of sample characterization using SEM-EDS are dominated by the element O by 47.98%, C by 37.47%, Si by 6.90% and Al by 3.63%. Based on the results research, it can be concluded that variations in heating temperature and time affect the mechanical properties, physical properties and characteristics of geopolymers made from fly ash and boiler slag.

Key words: *geopolymer, curing, fly ash, boiler slag, characterization*

**PENGARUH VARIASI SUHU DAN WAKTU TERHADAP SIFAT
MEKANIS, SIFAT FISIS DAN KARAKTERISTIK GEOPOLIMER
BERBAHAN *FLYASH* DAN *SLAG BOILER***

Oleh

PUTRI RAMADHANI ARUM SARI

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



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

Judul Skripsi : **PENGARUH VARIASI SUHU DAN WAKTU TERHADAP SIFAT MEKANIS, SIFAT FISIS DAN KARAKTERISTIK GEOPOLIMER BERBAHAN FLY ASH DAN SLAG BOILER**

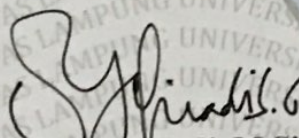
Nama Mahasiswa : **Putri Ramadhani Arum Sari**

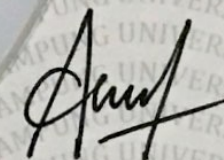
Nomor Pokok Mahasiswa : **1917041060**

Jurusan : **Fisika**

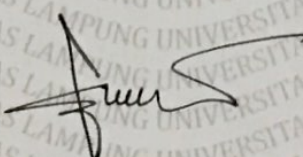
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**




Drs. Syafriadi, M.Si
NIP. 196108211992031002


Dr. Sudibyo, S.T., M.Sc.
NIP. 19820327015021002

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

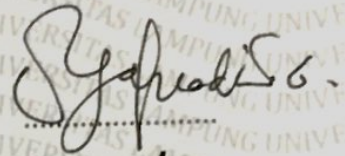

Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002

MENGESAHKAN

I. Tim Penguji

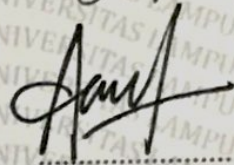
Ketua

: Drs. Syafriadi, M.Si.



Sekretaris

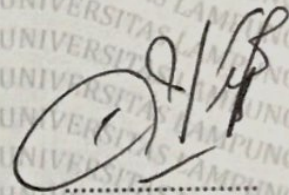
: Dr. Sudibyo, S.T., M.Sc.



Penguji

Bukan Pembimbing

: Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.

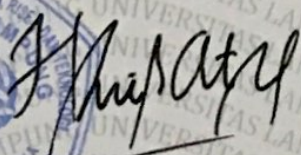


2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 1971100120050011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 23 April 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 disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

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

Bandar Lampung, 23 April 2024
Penulis,



Putri Ramadhani Arum Sari
NPM. 1917041060

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Putri Ramadhani Arum Sari, dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 18 November 2001, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari Ayah bernama Lutfi Cahyono Adi dan Ibu bernama Ari Puspita.

Penulis menyelesaikan Pendidikan formal pertama kali di Taman Kanak-kanak (TK) Kartika II-26 Bandar Lampung pada tahun 2007, Pendidikan dasar di Sekolah Dasar (SD) Negeri 2 Calang, Aceh Jaya pada tahun 2013, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 1 Dringu, Probolinggo, Jawa Timur pada tahun 2016 dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 1 Meulaboh, Aceh Barat pada tahun 2019.

Pada tahun 2019, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai Anggota Bidang Minat dan Bakat HIMAFI FMIPA Universitas Lampung periode 2020-2021 dan Anggota Biro KRT Rois FMIPA Universitas Lampung periode 2021. Penulis telah menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan pada tahun 2022. Penulis juga melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung tahun 2022 di Desa Karya Makmur, Kecamatan Labuhan Maringgai, Lampung Timur.

MOTTO

**“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan,
Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”**

(Q.S Al-Insyirah, 94: 5-6)

**“Apa yang melewatkanmu tidak akan pernah menjadi takdirmu dan apa yang
ditakdirkan untukmu tidak akan pernah melewatkanmu”**

(Umar bin Khattab)

**“Beberapa doa dan keinginan memang sengaja Allah tahan, sebab Allah
tahu kapan waktu yang tepat untuk mengabulkan setiap harapan”**

(Edi Gunawan)

“It’s never too late to make changes in your life. Set new goals for yourself.

Allah is the most merciful”

(Muslim)

“Part of the journey is the end”

(Tony Stark, Iron Man)

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, Sholawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW.

Aku persembahkan karya ini kepada:

Ayahanda Lutfi Cahyono Adi dan Ibunda Ari Puspita

Sebagai tanda terima kasihku kepada Papa dan Mama tercinta
Terima kasih atas segala doa, usaha dan dukungan terbaik yang telah diberikan

Kakakku Arfina Shella Meilany dan **Adikku** Raden Panji Ananda W.P. Adi

Terima kasih telah memberikan semangat, dukungan dan doa

Seluruh Sahabat dan Keluarga Besar Fisika 2019

Yang selalu memberikan semangat dan dukungan

Almamater Tercinta, Universitas Lampung

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, yang telah memberikan nikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Terhadap Sifat Mekanis, Sifat Fisis, dan Karakteristik Geopolimer Berbahan *Fly Ash* dan *Slag Boiler*”** yang merupakan syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyajian skripsi ini masih terdapat kekurangan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak guna perbaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menjadi rujukan untuk penelitian selanjutnya agar lebih sempurna dan dapat memperkaya ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 23 April 2024

Putri Ramadhani Arum Sari

SANWACANA

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Terhadap Sifat Mekanis, Sifat Fisis dan Karakteristik Geopolimer Berbahan *Fly Ash* dan *Slag Boiler*”** yang merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.

Dalam proses penulisan skripsi dapat berjalan dikarenakan terdapat banyak pihak yang membantu. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan motivasi, semangat, kritik, saran dan bimbingan dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Sudiby, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing II yang telah memberikan kritik, saran dan bimbingan dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan saran dalam skripsi ini.
4. Bapak Muhammad Amin, S.T. selaku Pembimbing Lapangan yang telah memberikan motivasi, kritik, saran dan bimbingan dalam menyelesaikan skripsi ini.

5. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan bimbingan selama masa studi di Jurusan Fisika.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA, Universitas Lampung.
7. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Lampung.
8. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. selaku Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Lampung.
9. Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan yang telah memfasilitasi penulis selama penelitian berlangsung.
10. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
11. Bapak Badriyadi, Bapak Edi, Tete Amna dan seluruh staff Jurusan Fisika FMIPA yang telah membantu dalam segala urusan administrasi.
12. Kedua Orang tua, Papa Lutfi Cahyono Adi dan Mama Ari Puspita, Kakak Arfina Shella Meilany, S.Kom., dan Adik Raden Panji Ananda W.P.Adi atas doa dan dukungan kepada penulis sehingga dapat mengerjakan skripsi dengan lancar.
13. Sahabat terbaikku Ailya Nurul Ilma, Alya Hafiz, Khairunnisa, Lisana Shidqin ‘Aliya, Syaima Camilla, Yuyun Savela, Selly Dwi Istanti, Riska Dwi Yanti dan Fadhlul Amar yang telah memberikan bantuan, motivasi, dukungan dan doa kepada penulis selama masa perkuliahan hingga menyelesaikan skripsi ini.
14. Sahabat KKN Unila Desa Karya Makmur, Kec. Labuhan Maringgai, Kab. Lampung Timur, Berlian Sasya, Raineven Sailano, Yolanda Nababan, Anwar, Hijrah dan Farhan atas segala kenangan indah serta persahabatan yang terjalin hingga saat ini.

15. Seluruh mahasiswa/i Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung Angkatan 2019 yang telah berjuang bersama selama masa perkuliahan.
16. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam proses penyelesaian skripsi ini dan belum bisa disebutkan satu persatu.

Bandar Lampung, 23 April 2024

Putri Ramadhani Arum Sari
NPM. 1917041060

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
MENGESAHKAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	6

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geopolimer	7
2.2 <i>Fly Ash</i>	9
2.3 <i>Slag Boiler</i>	10
2.4 Natrium Hidroksida (NaOH)	11
2.5 Natrium Silikat (Na_2SiO_3).....	12
2.6 Reaksi Geopolimerisasi.....	13
2.7 Uji Mekanis.....	14
2.7.1 Kuat Tekan.....	14
2.8 Uji Fisis	15
2.8.1 Porositas	15
2.8.2 Absorpsi.....	15
2.8.3 Densitas	16
2.9 Karakterisasi	16
2.9.1 <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	16
2.9.2 <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)</i>	17

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	20
3.2 Alat dan Bahan.....	20
3.2.1 Alat Penelitian.....	20
3.2.2 Bahan Penelitian.....	20
3.3 Prosedur Penelitian.....	21
3.3.1 Preparasi Bahan.....	21
3.3.2 Pembuatan Geopolimer	21
3.3.3 Uji Kuat Tekan.....	22
3.3.4 Uji absorpsi, porositas dan densitas	23
3.3.5 Karakterisasi Geopolimer.....	24
3.4 Diagram Alir	24
3.4.1 Diagram Alir Preparasi Bahan	24
3.4.2 Diagram Alir Pembuatan Sampel Geopolimer	25
3.4.3 Diagram Alir Uji Mekanis Sampel Geopolimer	27
3.4.4 Diagram Alir Uji Fisis Sampel Geopolimer	28
3.4.5 Diagram Alir Karakterisasi Sampel Geopolimer	29
3.4.6 Diagram Alir Penelitian	30

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Pemanasan Terhadap Sifat Mekanis Geopolimer Berbahan <i>Fly Ash</i> dan <i>Slag Boiler</i>	31
4.2 Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Pemanasan Terhadap Sifat Fisis Geopolimer Berbahan <i>Fly Ash</i> dan <i>Slag Boiler</i>	34
4.2.1 Hasil Uji Absorpsi.....	34
4.2.2 Hasil Uji Porositas.....	36

4.2.3 Hasil Uji Densitas	37
4.3 Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Pemanasan Terhadap Komposisi Kimia Geopolimer Berbahan <i>Fly Ash</i> dan <i>Slag Boiler</i>	39
4.3.1 Hasil Karakterisasi Bahan <i>Fly Ash</i> dan <i>Slag Boiler</i> menggunakan <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	39
4.3.2 Hasil Karakterisasi Sampel Mortar Geopolimer menggunakan <i>X- Ray Fluorescence (XRF)</i>	40
4.4 Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Pemanasan Terhadap Unsur Penyusun Geopolimer Berbahan <i>Fly Ash</i> dan <i>Slag Boiler</i>	41
4.4.1 Hasil Karakterisasi Sampel Mortar Geopolimer menggunakan SEM- EDS pada Kode Sampel 80C	41
4.4.2 Hasil Karakterisasi Sampel Mortar Geopolimer menggunakan SEM- EDS pada Kode Sampel 100A	43
4.4.3 Hasil Karakterisasi Sampel Mortar Geopolimer menggunakan SEM- EDS pada Kode Sampel 40A	45

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan	48
5.2 Saran.....	49

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.2. Prinsip XRF	17
Gambar 2.3. Skema SEM-EDS	18
Gambar 3.1 Diagram Alir Preparasi Bahan.....	24
Gambar 3.2 Diagram Alir Pembuatan Sampel Geopolimer.....	25
Gambar 3.3 Diagram Alir Uji Mekanis Geopolimer.....	27
Gambar 3.4 Diagram Alir Uji Fisis Geopolimer	28
Gambar 3.5 Diagram Alir Karakterisasi Geopolimer.....	29
Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 4.1 Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Pemanasan Terhadap Kuat Tekan Geopolimer	33
Gambar 4.2 Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Pemanasan Terhadap Absorpsi Geopolimer	35
Gambar 4.3 Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Pemanasan Terhadap Porositas Geopolimer	36
Gambar 4.4 Pengaruh Variasi Suhu dan Waktu Pemanasan Terhadap Densitas Geopolimer	38
Gambar 4.5 Hasil Karakterisasi Geopolimer dengan SEM.....	42
Gambar 4.6 Hasil Karakterisasi Mortar Geopolimer	42

Gambar 4.7 Hasil Karakterisasi Geopolimer dengan SEM.....	44
Gambar 4.8 Hasil Karakterisasi Mortar Geopolimer	44
Gambar 4.9 Hasil Karakterisasi Geopolimer dengan SEM.....	46
Gambar 4.10 Hasil Karakterisasi Mortar Geopolimer	46

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Komposisi dan Klasifikasi <i>Fly Ash</i>	10
Tabel 3.1. Pengkodean sampel dengan variasi suhu, waktu dan komposisi bahan	22
Tabel 4.1. Data Uji Kuat Tekan Mortar Geopolimer Suhu 40°C	32
Tabel 4.2. Data Uji Kuat Tekan Mortar Geopolimer Suhu 60°C	32
Tabel 4.3. Data Uji Kuat Tekan Mortar Geopolimer Suhu 80°C	32
Tabel 4.4. Data Uji Kuat Tekan Mortar Geopolimer Suhu 100°C	32
Tabel 4.5. Hasil Karakterisasi <i>Fly Ash</i> dan <i>Slag Boiler</i> menggunakan XRF	39
Tabel 4.6. Hasil Karakterisasi XRF pada Mortar Geopolimer	40
Tabel 4.7. Komposisi Unsur Mortar Geopolimer Kode Sampel 80C	43
Tabel 4.8. Komposisi Unsur Mortar Geopolimer Kode Sampel 100A	45
Tabel 4.9. Komposisi Unsur Mortar Geopolimer Kode Sampel 40A	47

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara berkembang dengan industri konstruksi yang sangat maju. Dalam konstruksi dibutuhkan beberapa bahan bangunan seperti semen, agregat, dan pasir. Semen merupakan bahan baku yang diperlukan dalam konstruksi karena berfungsi sebagai perekat yang dapat mengikat bahan lain menjadi satu dan membuatnya kuat (Amin dan Suharto, 2017). Ketergantungan penggunaan semen meningkatkan produksi semen Portland yang ternyata berdampak negatif terhadap lingkungan, karena proses produksinya menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah yang sangat besar.

Pada tahun 1978, Joseph Davidovits menemukan sebuah perekat alternatif pengganti semen yang dikenal sebagai geopolimer. Geopolimer merupakan material anorganik yang juga dikenal sebagai *alkali-activated materials* (AAMs) yang digunakan sebagai bahan pengganti semen dan banyak mengandung unsur Si dan Al. (Singh, et al., 2018). Geopolimer dapat menggunakan bahan alami dan produk limbah sebagai bahan baku utama yang disintesis dengan reaksi aktivasi alkali atau asam (Lahoti, et al., 2018). Geopolimer memiliki keunggulan tahan api, tahan korosi kimia, kekuatan mekanik yang tinggi dan daya tahan yang sangat baik (Shill, et al., 2020).

Alkali-activated materials hadir sebagai alternatif yang berkelanjutan untuk semen portland, dengan konsumsi bahan baku yang lebih sedikit dan emisi CO₂ yang sangat rendah. Geopolimer diproduksi melalui aktivasi aluminosilikat dengan larutan alkali (Huseien, *et al.*, 2022). Penggunaan geopolimer memberikan keuntungan dalam pemanfaatan limbah industri yang ramah lingkungan (Olivia, 2011).

Geopolimer adalah material geosintetik yang reaksi ikatannya terjadi melalui reaksi polimerisasi dan bukan melalui reaksi hidrasi seperti pada beton konvensional (Davidovits, 2005; Adjei, *et al.*, 2022). Pada proses geopolimer, terjadi reaksi kimia antara alumina-silikat oksida dengan polisilikat alkali yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al. Polisilikat umumnya berupa natrium silikat yang diperoleh dari industri kimia dalam proses metalurgi ferrosilicon (Amritphale, *et al.*, 2019).

Fly ash merupakan salah satu bahan yang digunakan dalam pembuatan geopolimer. *Fly ash* merupakan sisa pembakaran batu bara yang berbentuk serbuk halus yang biasanya dihasilkan oleh pabrik dan pembangkit listrik (Zhuang, *et al.*, 2016). *Fly ash* memiliki sifat pozzolan yang memungkinkan untuk meningkatkan kekuatan beton. Perbandingan antara *fly ash* dan semen portland dapat dilihat dari tiga kesamaan sifat dari kedua bahan tersebut, yaitu sifat fisik, sifat kimia, dan sifat pozzolan (Toniolo dan Boccaccini, 2017).

Slag boiler merupakan bahan alternatif yang juga banyak digunakan dalam pembuatan geopolimer. *Slag boiler* merupakan limbah hasil pembakaran cangkang kelapa sawit yang mengandung unsur Si dan Al. *Slag boiler* kelapa sawit merupakan komponen yang memiliki jumlah silika paling dominan, yaitu sebesar

61% pada cangkang dan 59,1% pada serat kelapa sawit (Yusuf, *et al.*, 2014). Sama halnya dengan *fly ash*, unsur-unsur tersebut menjadikan *slag boiler* sebagai material alternatif pengganti semen karena mengandung banyak silika dan alumina yang sangat dibutuhkan dalam proses geopolimerisasi, sehingga jika dicampurkan akan membentuk sifat dengan kuat tekan yang tinggi (Ariffin, *et al.*, 2011).

Geopolimer dengan material *fly ash* dan abu sawit sudah diteliti sebelumnya dengan melakukan penelitian terhadap sifat fisik geopolimer dengan bahan dasar campuran abu terbang (*fly ash*) dan abu sawit. Penelitian dilakukan pembuatan mortar geopolimer dengan mencampurkan *fly ash* dan abu sawit dengan alkali aktivator yaitu NaOH dan Na₂SiO₃. Pengujian yang dilakukan yaitu uji kuat tekan. Hasil kuat tekan paling tinggi dari campuran *fly ash* dan abu sawit dengan persentase 75:25. Dari penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa kuat tekan geopolimer campuran *fly ash* dan abu sawit dipengaruhi persentase campuran kedua bahan tersebut, dan pemberian suhu tinggi membuat geopolimer yang dihasilkan memiliki kuat tekan yang tinggi karena reaksi polimerisasi berlangsung lebih cepat (Islami, *et al.*, 2015).

Penelitian lainnya mengenai geopolimer dengan campuran *fly ash* dan *slag boiler* yaitu penelitian yang dilakukan untuk mengetahui perbandingan ketahanan geopolimer dan beton biasa dengan metode pemanasan. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki ketahanan lebih baik dibandingkan beton biasa, karena pada beton geopolimer mengalami kerusakan pada suhu 600°C dan 800°C sedangkan beton biasa mulai rusak pada suhu 200°C (Hussin, *et al.*, 2014).

Berdasarkan uraian di atas, maka dilakukan penelitian tentang pengaruh variasi suhu dan waktu terhadap sifat mekanis, sifat fisis, dan karakteristik geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*. Metode yang digunakan yaitu metode pemanasan. Pada penelitian ini dilakukan uji mekanis, uji fisis, serta karakterisasi dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh suhu dan waktu terhadap sifat mekanis (kuat tekan) dan sifat fisis (absorpsi, porositas dan densitas) pada geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*?
2. Bagaimana pengaruh suhu dan waktu terhadap komposisi kimia pada geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*?
3. Bagaimana pengaruh suhu dan waktu terhadap unsur penyusun geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh suhu dan waktu terhadap sifat mekanis (kuat tekan) dan sifat fisis (absorpsi, porositas dan densitas) pada geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*.

2. Mengetahui pengaruh suhu dan waktu terhadap komposisi kimia pada geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*.
3. Mengetahui pengaruh suhu dan waktu terhadap unsur penyusun geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan yaitu *fly ash*, *slag boiler*, NaOH, Na₂SiO₃, dan air.
2. *Fly Ash* batu bara yang digunakan berasal dari PLTU Tarahan, Lampung Selatan.
3. *Slag Boiler* yang digunakan berasal dari PTPN VII Unit Bekri, Lampung Tengah.
4. NaOH dan Na₂SiO₃ yang digunakan berasal dari PRTP-BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan
5. Variasi suhu yang digunakan dalam pemanasan geopolimer adalah 40°C, 60°C, 80°C dan 100°C.
6. Variasi waktu yang digunakan dalam pemanasan geopolimer adalah 6 jam, 10 jam dan 14 jam.
7. Konsentrasi NaOH 10 M.
8. Ukuran sampel geopolimer 5 x 5 x 5 cm³.
9. Sampel dilakukan uji mekanis yang dilakukan yaitu kuat tekan dengan menggunakan mesin uji kuat tekan (*Computer Universal Testing Machines Type HT-2402 Made in Taiwan*).

10. Sampel dilakukan uji fisis yang dilakukan yaitu absorpsi, porositas dan densitas dengan menggunakan metode Archimedes.
11. Sampel dikarakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) dengan menggunakan mesin XRF *PanAnalytical type minipal 4* dan *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS) menggunakan mesin SEM-EDS Quattro S.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

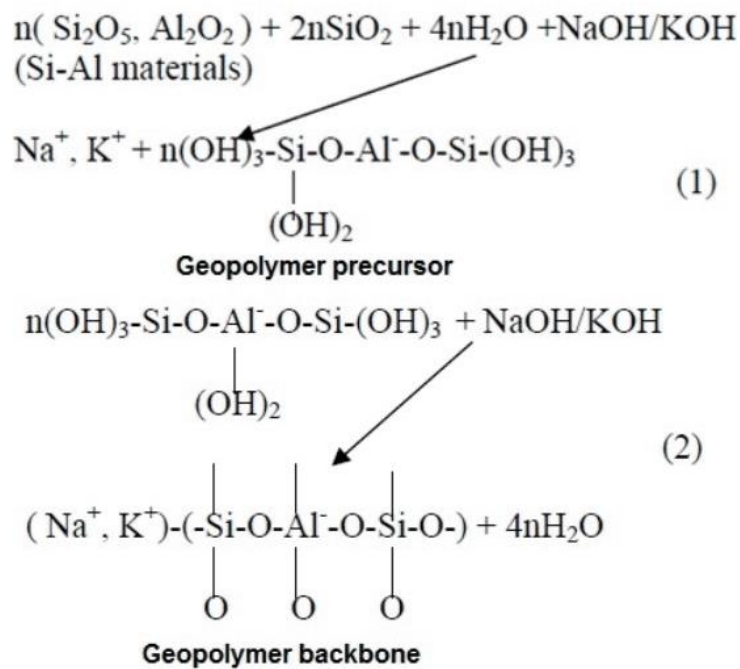
1. Sebagai informasi dalam studi pengaruh variasi suhu dan waktu terhadap sifat mekanis, fisis dan karakteristik geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*.
2. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung dalam bidang Fisika Material.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geopolimer

Geopolimer merupakan material anorganik yang tersusun dari atom Si dan Al. Konsep geopolimer pertama kali ditemukan oleh Joseph Davidovits pada tahun 1978. Geopolimer merupakan material yang ramah lingkungan dan dapat dikembangkan sebagai alternatif pengganti beton semen di masa yang akan datang. Geopolimer lebih ramah lingkungan, karena selain dapat menggunakan bahan pembuangan industri, proses pembuatannya juga tidak perlu energi, seperti pada proses pembuatan semen hingga suhu 800°C, sedangkan pada geopolimer cukup dengan pemanasan 60°C selama sehari penuh, maka bisa dihasilkan beton dengan kualitas tinggi (Davidovits, 1999).

Beton geopolimer merupakan beton dengan reaksi pengikatannya terjadi melalui reaksi polimerisasi dan bukan melalui reaksi hidrasi seperti pada beton konvensional. Beton geopolimer menggunakan bahan alami dengan kandungan silikon dan aluminium tinggi yang bereaksi dengan larutan alkali aktivator untuk berpolimerisasi menjadi rantai molekul dan jaringan. Proses polimer yang terjadi pada geopolimer meliputi reaksi kimia antara alkali dengan Si dan Al sehingga menghasilkan ikatan struktur Si-O-Al-O yang tetap (Davidovits, 2005). Skema proses geopolimerisasi ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.



Persamaan 2.1 Skema Reaksi Geopolimerisasi (Singh, 2018)

Adapun tahapan-tahapan yang terjadi saat polimerisasi, yaitu: pertama, atom Al dan Si yang ada dalam material larut oleh aksi ion hidroksida, kemudian ion prekursor diubah menjadi monomer, lalu polikondensasi monomer menjadi polimer. Ketiga tahapan ini terjadi hampir bersamaan dan tumpang tindih (*overlap*). Pada reaksi (2), terlihat bahwa selama proses polimerisasi terjadi pelepasan molekul air. Hal ini juga menjadi salah satu perbedaan geopolimer dengan semen portland, karena reaksi pembentukan semen portland mengkonsumsi air (Singh, 2018).

Sifat-sifat pada geopolimer dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor ini seperti jenis dan takaran aktivator, modulus aktivator, suhu perawatan, jangka waktu perawatan, dan kadar air perawatan. Komposisi aktivator dalam jumlah yang tepat menjadi salah satu parameter untuk menghasilkan geopolimer dengan mutu yang baik (Hardjito, 2005).

Kelebihan dari geopolimer yaitu tahan terhadap sulfat, memiliki susut yang kecil, tahan terhadap reaksi alkali silika, tahan terhadap api dan ramah lingkungan. Sedangkan kekurangannya yaitu rumit dalam pembuatannya karena jumlah material yang digunakan lebih banyak dan mahal serta belum adanya desain campuran yang pasti (Hardjito dan Rangan, 2005).

2.2 *Fly Ash*

Fly ash atau disebut juga abu terbang merupakan hasil dari sisa pembakaran batu bara yang berbentuk partikel halus amorf. Abu tersebut merupakan bahan anorganik yang terbentuk dari perubahan mineral karena proses pembakaran. Penggunaan material *fly ash* sebagai material pembentuk beton didasari pada sifat material yang memiliki kemiripan dengan semen (Setiawati, 2018).

Berdasarkan *American Concrete Institute (ACI Manual of Concrete Practice 1993 parts 1 226.3R-3)*, *fly ash* dapat dibedakan menjadi 3 jenis yaitu:

1. Kelas C

Fly ash yang mengandung CaO lebih dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran *lignite* atau *sub-bitumen* batu bara (batu bara muda).

2. Kelas F

Fly ash yang mengandung CaO kurang dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran *anthracite* atau bitumen batu bara.

3. Kelas N

Pozzolan alam atau hasil pembakaran yang dapat digolongkan antara lain tanah *diatomic*, *opaline chertz* dan *shales, tuff*, dan abu vulkanik yang biasa diproses

melalui pembakaran atau tidak melalui proses pembakaran. Selain itu, juga mempunyai sifat pozzolan yang baik (Marthinus, *et al.*, 2015).

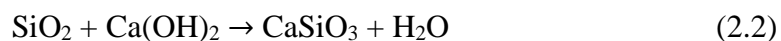
Komposisi dan klasifikasi *fly ash* dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1. Komposisi dan klasifikasi *fly ash*

Komponen	Bituminus	Sub-bituminus	Lignit
SiO ₂	20-60	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	20-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-10
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

Sumber: (Setiawati, 2018).

Fly ash disebut juga *low calcium fly ash*, yang tidak mempunyai sifat *cementitious* dan hanya bersifat *pozzolanic* reaksi hidrasi. Reaksi hidrasi pada *fly ash* yaitu:



Fly ash memiliki sifat pozzolan yang memungkinkan untuk meningkatkan kekuatan beton. Perbandingan antara *fly ash* dan semen portland dapat dilihat dari tiga kesamaan sifat dari kedua bahan tersebut, yaitu sifat fisik, sifat kimia, dan sifat pozzolan (Toniolo dan Boccaccini, 2017). Penggunaan *fly ash* pada beton tidak hanya memberikan keuntungan pada lingkungan, tetapi juga meningkatkan kinerja dan kualitas beton itu sendiri (Sumajouw dan Dapas, 2013).

2.3 Slag Boiler

Slag boiler merupakan limbah berupa abu hasil pembakaran (*boiler ash*) yang berasal dari cangkang kelapa sawit. *Slag boiler* ini berasal dari kerak *boiler* yang mengalami proses penggilingan yang telah dihaluskan. *Slag boiler* ini pada

dasarnya adalah abu yang mengeras pada setiap dinding-dinding *boiler* akibat endapan abu yang terperangkap saat terjadinya pembakaran cangkang dan serat kelapa sawit pada tungku pembakaran *boiler*. *Slag boiler* banyak mengandung unsur-unsur geopolimer seperti silika dan alumina yang berguna untuk proses geopolimerisasi (Olivia, 2005).

Berdasarkan penelitian Yanuari, dengan melakukan pembakaran pada limbah kelapa sawit pada suhu 800°C-1000°C sebagai penghasil listrik dan tenaga uap pabrik kelapa sawit. Kemudian hasil pembakaran tersebut menghasilkan POFA (*Palm Oil Fuel Ash*) atau disebut abu sawit. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa kandungan kimia dari POFA adalah SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 lebih dari 60%. Menurut ASTM C-168 2005, POFA tersebut termasuk dalam bahan pozzolan tipe C dan telah memenuhi syarat sebagai pengganti semen. Pemanfaatan POFA sebagai pozzolan berpotensi menjadi pengganti semen karena banyak mengandung unsur Si dan Al, serta dapat mengatasi masalah lingkungan (Yanuari, *et al.*, 2020).

2.4 Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium hidroksida (NaOH) atau dikenal juga sebagai sodium hidroksida merupakan jenis basa logam kaustik. Natrium hidroksida terbentuk dari oksida basa natrium oksida yang dilarutkan dalam air. Natrium hidroksida murni berbentuk putih padat dan tersedia dalam bentuk pelet, serpihan, butiran, dan larutan jenuh 50%. NaOH bersifat lembab cair dan secara spontan menyerap karbon dioksida dari udara bebas. NaOH juga sangat larut dalam air dan akan melepaskan kalor ketika dilarutkan dalam air (Amin, *et al.*, 2019).

Larutan NaOH bersifat sangat basa dan biasanya digunakan untuk reaksi dengan asam lemah. NaOH merupakan aktivator yang berfungsi mereaksikan unsur-unsur Si dan Al pada beton geopolimer yang dapat menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dari pada KOH. Semakin tinggi konsentrasi NaOH maka semakin tinggi pula kekuatan beton geopolimer yang dihasilkan, hal ini disebabkan jumlah mol semakin banyak, sehingga reaksi polimernya semakin kuat (Salain, 2020).

Larutan aktivator untuk geopolimer dapat berupa natrium hidroksida (NaOH), natrium sulfat (Na_2SO_4), natrium silikat (Na_2SiO_3), kalium hidroksida (KOH) dan natrium karbonat (Na_2CO_3). Campuran natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) lebih banyak digunakan karena dapat menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan tinggi (Yanuari, 2020).

2.5 Natrium Silikat (Na_2SiO_3)

Natrium Silikat (Na_2SiO_3) atau yang lebih dikenal dengan *water glass* merupakan nama umum dari sodium metasilikat. Natrium silikat dapat dibuat dengan 2 proses yaitu proses basah dan proses kering. Natrium silikat terdapat dalam 3 bentuk, yaitu padatan dan larutan. Untuk campuran beton biasanya lebih banyak digunakan dalam bentuk larutan. Natrium silikat ini merupakan salah satu larutan alkali yang memainkan peran penting dalam proses polimerisasi karena mempunyai fungsi untuk mempercepat polimerisasi (Kasyanto, 2012).

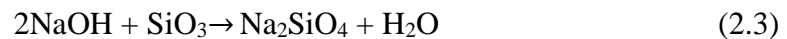
Natrium silikat adalah salah satu bahan industri kimia yang banyak dibutuhkan oleh industri kimia dalam negeri. Produk ini juga biasanya digunakan sebagai bahan

perekat, cat tahan api, pembuatan keramik, sebagai bahan sebagai katalisator yang dapat mempercepat reaksi kimia (Thesman, 2020).

2.6 Reaksi Geopolimerisasi

Geopolimer merupakan beton dengan reaksi pengikatannya terjadi melalui reaksi polimerisasi dan bukan melalui reaksi hidrasi seperti pada beton konvensional. Geopolimer menggunakan bahan alami dengan kandungan silika dan alumina tinggi yang bereaksi dengan larutan alkali aktivator untuk berpolimerisasi menjadi rantai molekul dan jaringan (Davidovits, 2005).

Reaksi kimia alkali aktivator antara natrium hidroksida dan natrium silikat terlihat di bawah ini:



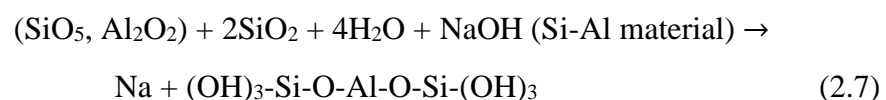
Reaksi hidrasi pada *fly ash* yaitu:

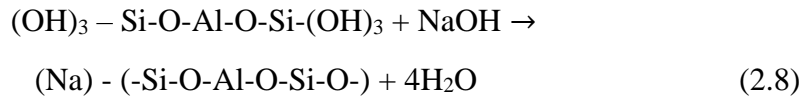


Mekanisme reaksi yang terjadi pada *slag boiler* yaitu:



Proses polimer yang terjadi pada geopolimer meliputi reaksi kimia antara alkali dengan Si dan Al sehingga menghasilkan ikatan struktur Si-O-Al-O yang tetap (Davidovits, 2005). Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:





Berikut adalah beberapa rumus kimia dari komponen utama geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler*:



$$\Delta G = 141,7 \text{ kJ/mol}$$

Beberapa hal yang terjadi selama reaksi geopolimerisasi yaitu atom Si dan Al yang ada dalam *fly ash* dapat larut oleh aksi ion hidroksida. Kemudian, ion prekursor dapat diubah menjadi monomer dan polikondensasi monomer menjadi struktur polimer (Singh, 2018).

2.7 Uji Mekanis

Sifat-sifat geopolimer dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis dan takaran aktivator, modulus aktivator, suhu perawatan, lama waktu perawatan, dan kadar air dalam larutan. Sifat-sifat mekanis dari beton geopolimer campuran *fly ash* dan *slag limbah boiler* akan dilihat melalui pengujian kuat tekan. Penggunaan bahan dasar yang berbeda memerlukan komposisi aktivator yang berbeda pula untuk menghasilkan kuat tekan yang tinggi (Islami, *et al.*, 2015).

2.7.1 Kuat Tekan

Kuat tekan adalah sifat kemampuan material menahan suatu beban tekan. Sifat yang diperhitungkan pada beton sebagai elemen struktur bangunan adalah kuat tekannya (Irawati, *et al.*, 2015). Untuk mengetahui kuat tekan beton diperlukan pengujian

dengan membuat benda uji kubus atau silinder. Berdasarkan SNI 03-6805-2002, kuat tekan dapat dihitung melalui persamaan 2.10.

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.10)$$

Keterangan:

P = Kuat tekan (MPa)

F = Gaya tekan maksimum (N)

A = Luas penampang (mm^2)

2.8 Uji Fisis

2.8.1 Porositas

Porositas merupakan perbandingan volume pori terhadap volume yang dapat dinyatakan dalam rentang 0 – 100% (Ridha dan Darminto, 2016). Persentase porositas ditentukan oleh jenis bahan, kehalusan unsur bahan, kepadatan dinding bahan, serta suhu (Giancoli, 2005). Menurut ASTM-C 642-06, nilai porositas dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.11).

$$P = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \times 100\% \quad (2.11)$$

Keterangan:

P = Nilai porositas (%)

W_1 = Massa awal (g)

W_2 = Massa setelah direndam (g)

W_3 = Massa di dalam air (g)

2.8.2 Absorpsi

Absorpsi adalah kemampuan suatu benda untuk menyerap karena dipengaruhi oleh kuat serapan air pada batuan. Penyerapan air merupakan perbandingan massa air yang terserap ke dalam pori terhadap massa kering batuan dalam persen. Menurut

ASTM-C 642-06, nilai absorpsi dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.12).

$$A = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (2.12)$$

Keterangan:

A = Absorpsi (%)

W_1 = Massa awal (g)

W_2 = Massa setelah direndam (g)

2.8.3 Densitas

Massa jenis atau densitas merupakan perbandingan massa dengan volume total batuan. Densitas juga merupakan sifat fisis batuan yang menggambarkan suatu kerapatan atau ikatan antar material penyusun batuan (Ridha dan Darminto, 2016). Menurut ASTM-C 642-06, nilai densitas dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.13).

$$\rho = \frac{W_1}{W_2 - W_3} \rho_{air} \quad (2.13)$$

Keterangan:

ρ = Massa jenis (g/cm³)

W_1 = Massa awal (g)

W_2 = Massa setelah direndam (g)

W_3 = Massa di dalam air (g)

ρ_{air} = Massa jenis air (g/cm³)

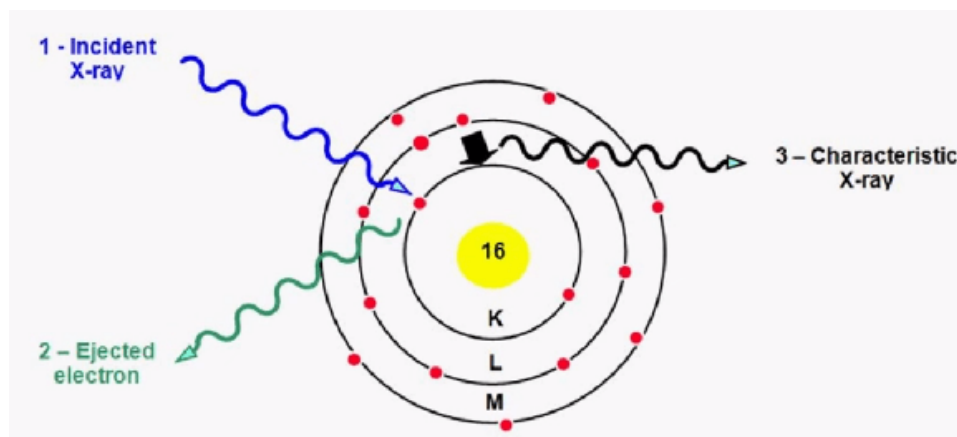
2.9 Karakterisasi

2.9.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

Karakterisasi menggunakan XRF digunakan untuk mengetahui komposisi kimia dari semua jenis bahan. Teknik ini dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur berdasarkan pada panjang gelombang dan jumlah sinar-X yang dipancarkan

kembali setelah suatu material ditembaki sinar-X berenergi tinggi. Bahan uji berupa padat, cair bubuk, hasil penyaringan atau bentuk lainnya. XRF terkadang juga bisa digunakan untuk menentukan ketebalan dan komposisi lapisan dan pelapis (Brouwer, 2010). Dalam XRF, sumber *X-Ray* meradiasi sampel sehingga unsur-unsur yang muncul dalam sampel akan memancarkan radiasi *X-Ray* neon dan energi diskrit, seperti warna untuk cahaya optik.

Metode XRF secara luas digunakan untuk menentukan komposisi suatu material, karena metode ini cepat dan tidak merusak sampel. Tergantung pada penggunaannya, XRF dapat dihasilkan tidak hanya oleh sinar-X tetapi juga sumber eksitasi primer yang lain seperti partikel alfa, proton atau sumber elektron dengan energi yang tinggi (Juwita, 2003).



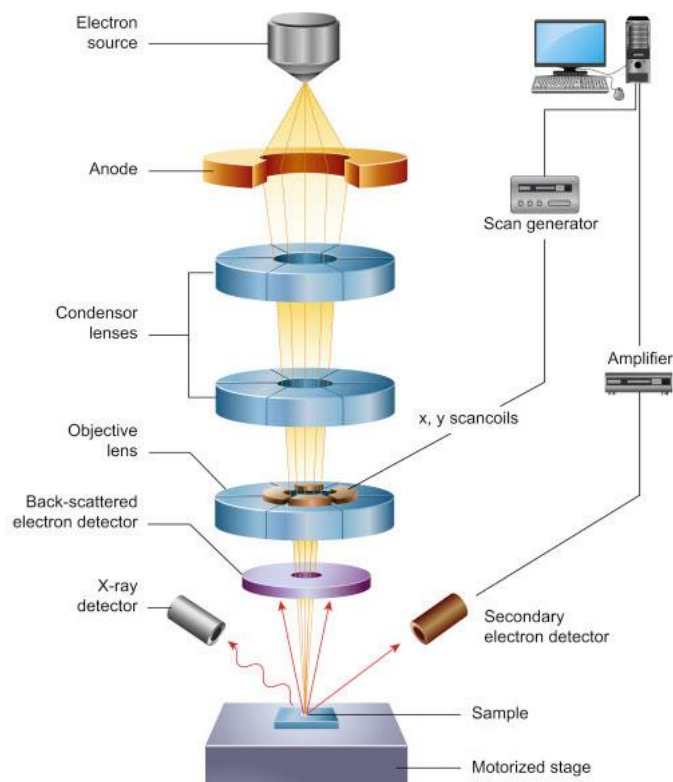
Gambar 2.1 Prinsip Kerja XRF (Fansuri, 2010)

2.9.2 Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan suatu analisis yang digunakan untuk mempelajari sifat-sifat permukaan suatu objek, 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 (Viklund, 2008).

Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) merupakan teknik analitik yang digunakan untuk melakukan analisis elemen atau karakterisasi kimia pada sampel. Aplikasi dari teknik SEM – EDS ada 3 jenis diantaranya yaitu topografi untuk menganalisa permukaan dan tekstur (kekerasan, reflektivitas, dan sebagainya), morfologi untuk menganalisa bentuk dan ukuran dari benda sampel dan komposisi untuk menganalisa komposisi dari permukaan benda secara kuantitatif dan kualitatif.



Gambar 2.2 Skema SEM-EDS (Inkson, 2016)

EDS dihasilkan dari Sinar-X karakteristik yaitu dengan menembakkan sinar X pada posisi yang ingin diketahui komposisi kimia. Maka setelah ditembakkan pada posisi yang diinginkan maka akan muncul puncak - puncak tertentu yang mewakili suatu unsur yang terkandung. Dengan EDS kita juga bisa membuat *elemental mapping* (pemetaan elemen) dengan memberikan warna berbeda dari masing - masing elemen di permukaan bahan. EDS bisa digunakan untuk menganalisa secara kuantitatif dari persentase masing - masing elemen (Newbury dan Ritchie, 2013).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada 01 Mei 2023 sampai dengan 30 Juni 2023 di Laboratorium Non-Logam, Pusat Riset Teknologi Pertambangan BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin uji kuat tekan (*Computer Universal Testing Machines Type HT-2402 Made in Taiwan*), *X-Ray Fluorescence (XRF)*, *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)*, *Gelas Beaker*, timbangan digital, oven, plastik *zipper*, sarung tangan, baskom, cetakan kubus ukuran $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$, batang pengaduk dan spidol *permanent*.

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari *fly ash*, *slag boiler*, NaOH, Na_2SiO_3 dan air.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi Bahan

1. *Fly Ash*

- *Fly ash* di *ball mill* selama 8 jam dan diayak dengan ukuran lolos 325 *mesh*.
- *Fly ash* dikarakterisasi menggunakan XRF.

2. *Slag Boiler*

- *Slag boiler* di *ball mill* selama 8 jam dan diayak dengan ukuran lolos 325 *mesh*.
- *Slag boiler* dikarakterisasi menggunakan XRF.

3.3.2 Pembuatan Geopolimer

1. Bahan yang disiapkan terdiri dari *fly ash*, *slag boiler*, NaOH, Na₂SiO₃ dan air.
2. NaOH sebanyak 200 gram dilarutkan dengan 500 ml air.
3. Na₂SiO₃ 100 ml dilarutkan dengan 150 ml NaOH untuk dibuat larutan alkali aktif.
4. *Fly ash* ditimbang sebanyak 400 gram dan *slag boiler* sebanyak 350 gram.
5. *Fly ash* dan *slag boiler* dicampurkan dengan 250 ml campuran dari larutan NaOH dan Na₂SiO₃.
6. Setelah campuran bahan diaduk secara merata, bahan dimasukkan ke dalam cetakan berukuran 5 x 5 x 5 cm³.
7. Sampel geopolimer didiamkan selama 24 jam kemudian dikeluarkan dari cetakan.
8. Sampel geopolimer dioven pada variasi suhu 40°C, 60°C, 80°C dan 100°C dengan variasi waktu selama 6 jam, 10 jam, dan 14 jam.

Tabel 3.1. Pengkodean sampel dengan variasi suhu, waktu dan komposisi bahan

Kode sampel	Suhu pemanasan (°C)	Waktu pemanasan (jam)	Komposisi bahan		
			<i>Fly ash</i> (g)	<i>Slag boiler</i> (g)	Aktivator (ml)
40A	40	6	400	350	250
40B	40	10	400	350	250
40C	40	14	400	350	250
60A	60	6	400	350	250
60B	60	10	400	350	250
60C	60	14	400	350	250
80A	80	6	400	350	250
80B	80	10	400	350	250
80C	80	14	400	350	250
100A	100	6	400	350	250
100B	100	10	400	350	250
100C	100	14	400	350	250

3.3.3 Uji Kuat Tekan

1. Sampel geopolimer disiapkan.
2. Sampel geopolimer diletakkan simetris dengan mesin uji kuat tekan.
3. Uji kuat tekan dilakukan, kemudian dicatat beban tekan maksimum yang dihasilkan oleh benda uji ketika *dial* tidak naik lagi.
4. Sampel geopolimer dihitung nilai kuat tekannya.

3.3.4 Uji Absorpsi, Porositas dan Densitas

1. Sampel geopolimer disiapkan.
2. Massa sampel geopolimer ditimbang dalam keadaan kering menggunakan timbangan digital (W_1).
3. Sampel geopolimer direndam ke dalam air selama 24 jam dengan tujuan agar permukaannya benar-benar basah.
4. Sampel diangkat dan diusap sisi permukaan sampel geopolimer yang berisi air, kemudian ditimbang menggunakan timbangan digital untuk mencatat massa sampel geopolimer setelah direndam dalam air (W_2).
5. Sampel geopolimer ditimbang kembali dalam keadaan digantung dalam air (W_3).
6. Selanjutnya, sampel geopolimer dihitung besar persentase porositas menggunakan persamaan (3.1), persentase absorpsi menggunakan persamaan (3.2) dan densitas menggunakan persamaan (3.3).

$$P = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \times 100\% \quad (3.1)$$

$$A = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (3.2)$$

$$\rho = \frac{W_1}{W_2 - W_3} \rho_{air} \quad (3.3)$$

Keterangan:

P = Nilai porositas (%)

A = Absorpsi (%)

ρ = Massa jenis (g/cm^3)

W_1 = Massa awal (g)

W_2 = Massa setelah direndam (g)

W_3 = Massa di dalam air (g)

ρ_{air} = Massa jenis air (g/cm^3)

3.3.5 Karakterisasi Geopolimer

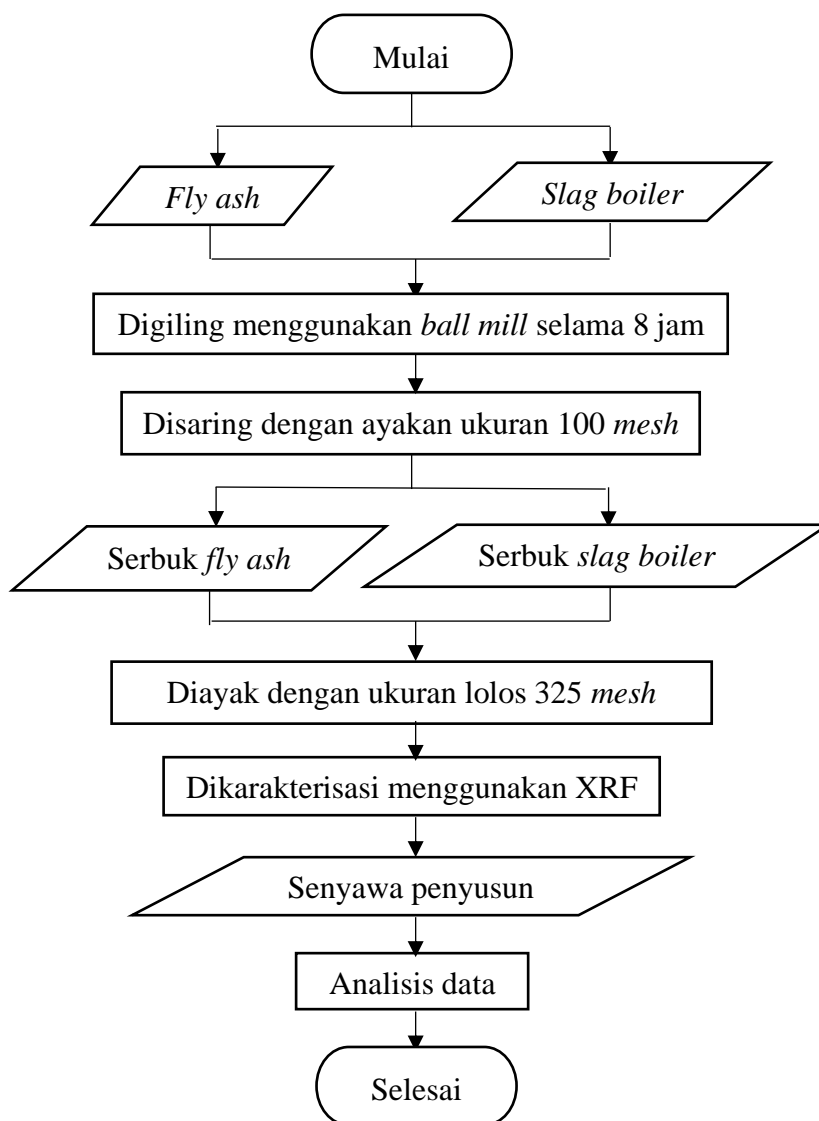
Sampel geopolimer dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS).

3.4 Diagram Alir

Secara garis besar, prosedur penelitian dapat dilihat dalam diagram alir berikut ini.

3.4.1 Diagram Alir Preparasi Bahan

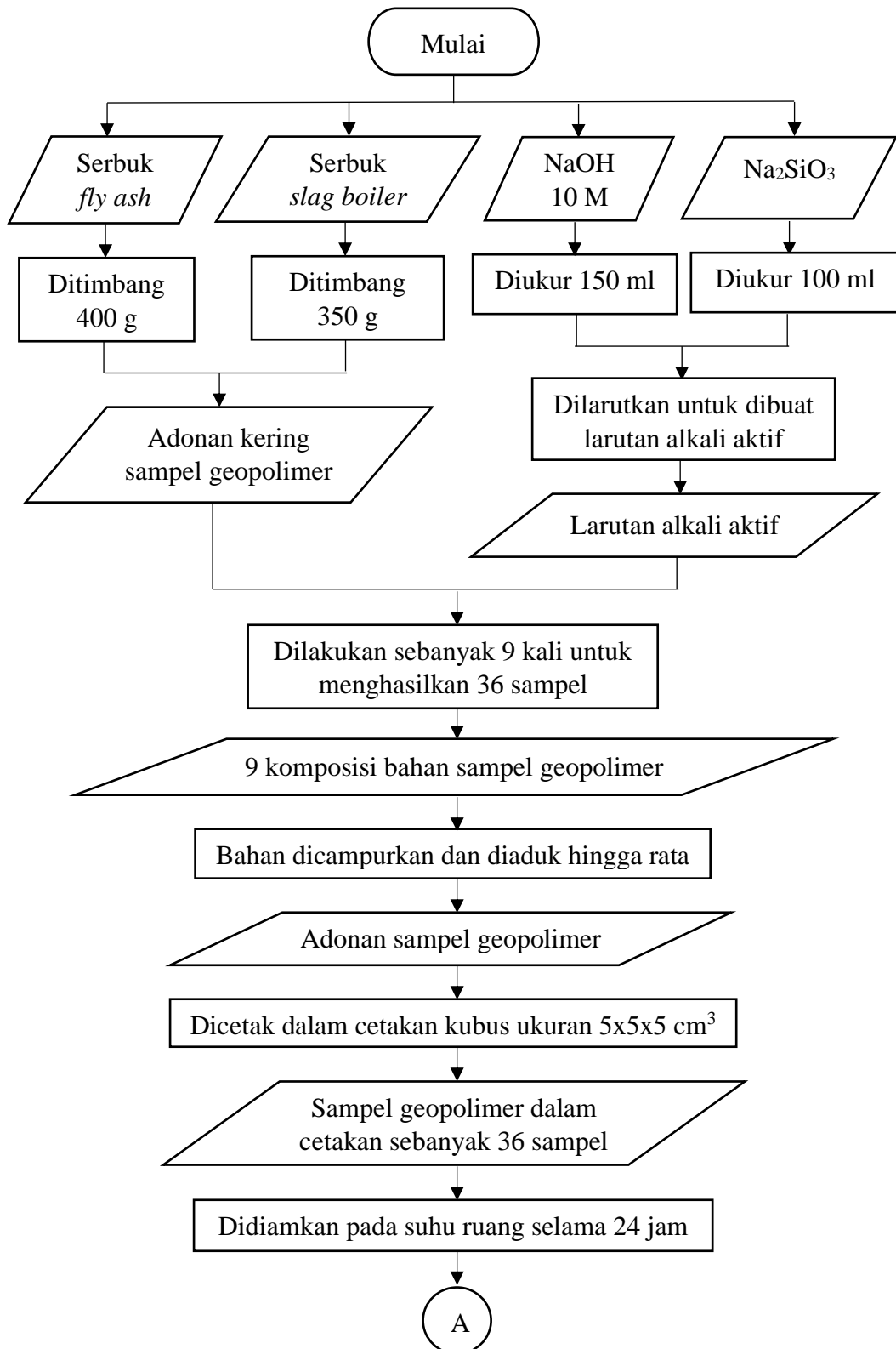
Diagram alir preparasi bahan ditunjukkan pada **Gambar 3.1**

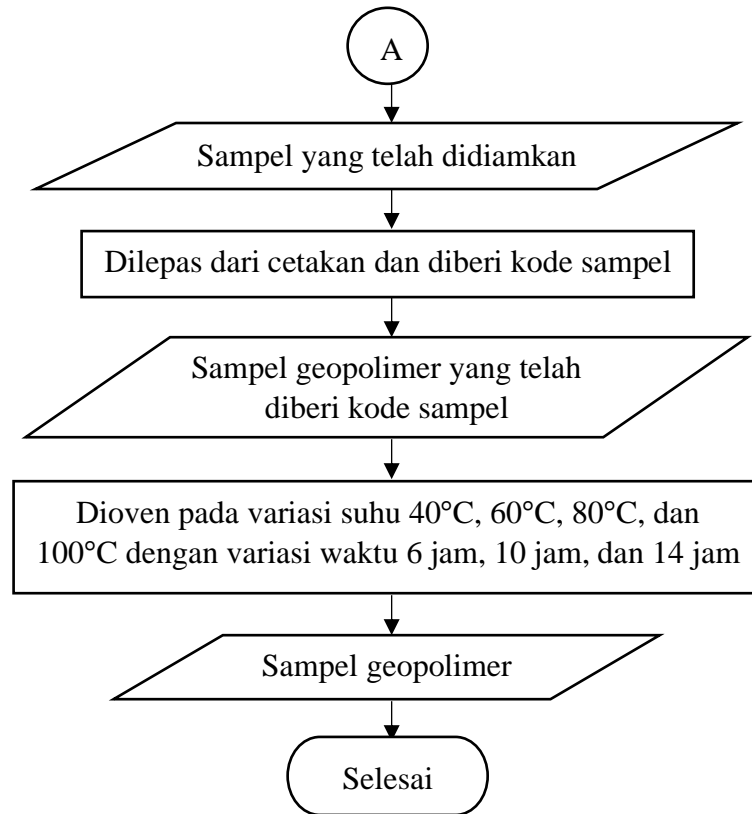


Gambar 3.1. Diagram Alir Preparasi Bahan

3.4.2 Diagram Alir Pembuatan Sampel Geopolimer

Diagram alir uji mekanis sampel geopolimer ditunjukkan pada **Gambar 3.2**

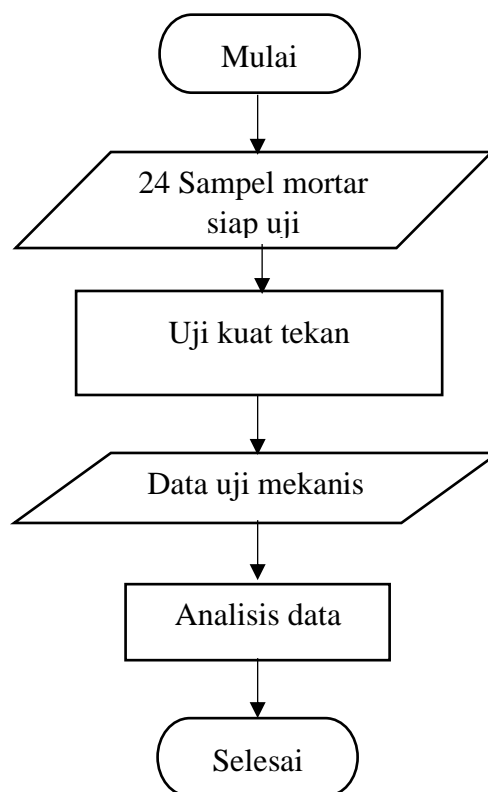




Gambar 3.2 Diagram Alir Pembuatan Sampel Geopolimer

3.4.3 Diagram Alir Uji Mekanis Sampel Geopolimer

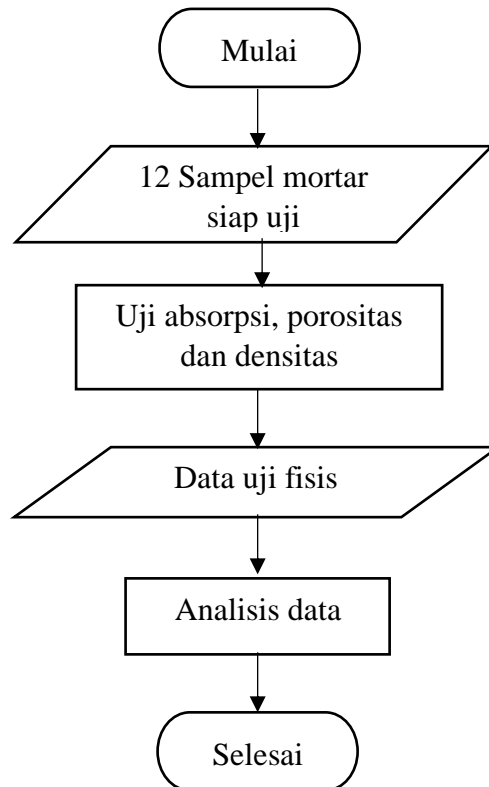
Diagram alir uji mekanis sampel geopolimer ditunjukkan pada **Gambar 3.3**



Gambar 3.3 Diagram Alir Uji Mekanis Sampel Geopolimer

3.4.4 Diagram Alir Uji Fisis Sampel Geopolimer

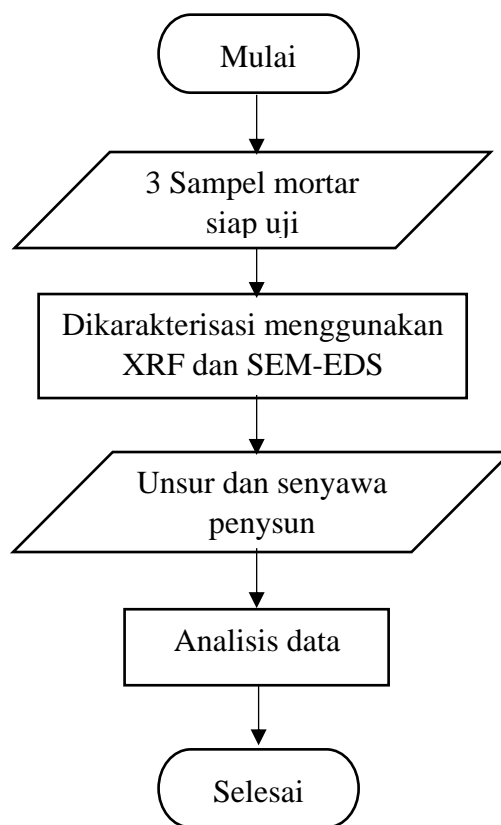
Diagram alir uji fisis sampel geopolimer ditunjukkan pada **Gambar 3.4**



Gambar 3.4 Diagram Alir Uji Fisis Sampel Geopolimer

3.4.5 Diagram Alir Karakterisasi Geopolimer

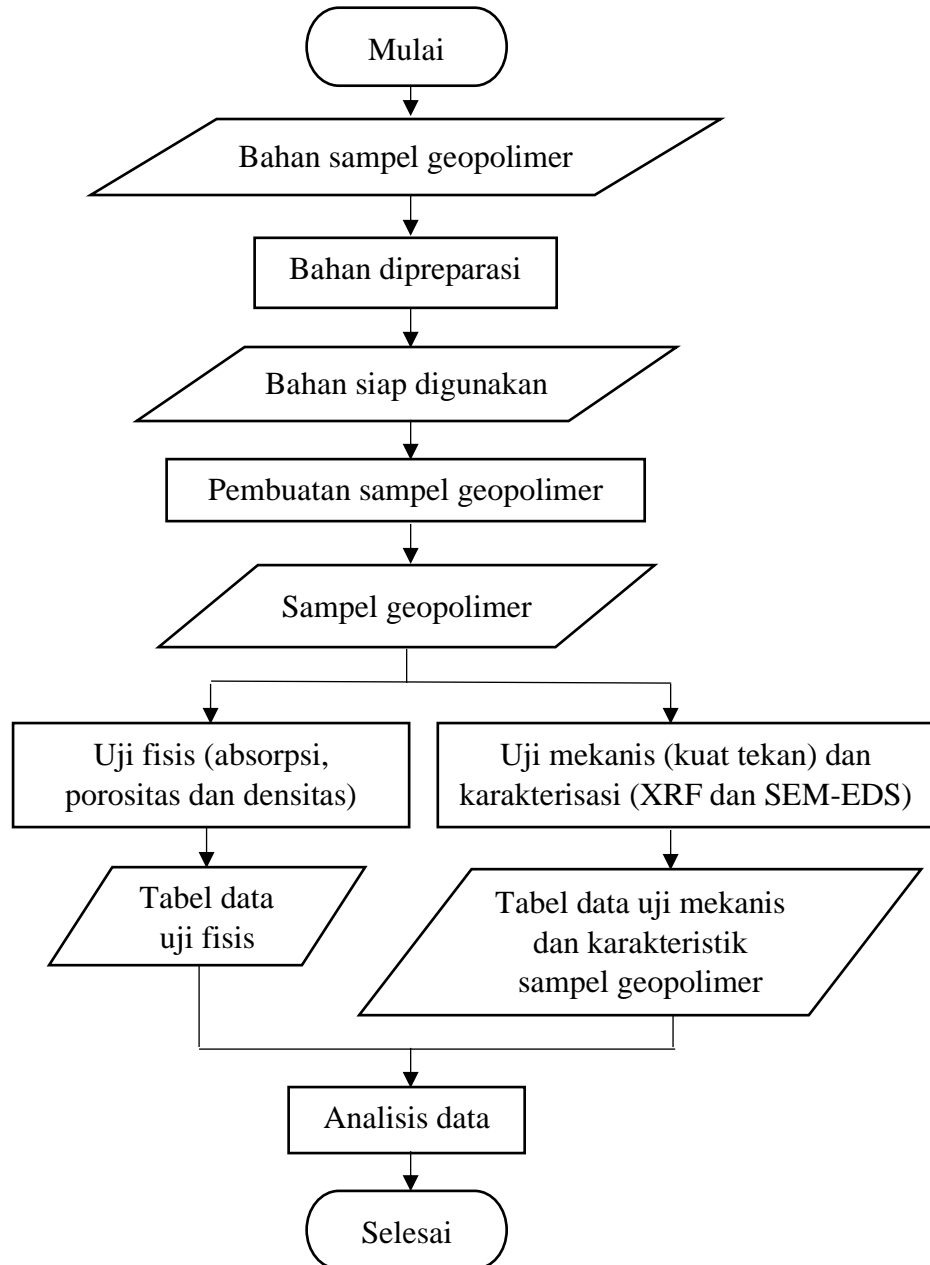
Diagram alir karakterisasi geopolimer ditunjukkan pada **Gambar 3.5**



Gambar 3.5 Diagram Alir Karakterisasi Geopolimer

3.4.6 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ditunjukkan pada **Gambar 3.6**



Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Sifat mekanis dan sifat fisis mortar geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler* dipengaruhi oleh suhu dan waktu. Semakin tinggi suhu dan semakin lama waktu pemanasan, maka semakin besar nilai kuat tekan dan densitas, serta semakin kecil nilai absorpsi dan porositas yang diperoleh. Geopolimer terbaik diperoleh pada suhu 80°C selama 14 jam dengan nilai kuat tekan diperoleh sebesar 22,80 MPa, densitas sebesar 3,40 g/cm³, absorpsi sebesar 5,80% dan porositas sebesar 19,73%.
2. Komposisi kimia sampel geopolimer terbaik berbahan *fly ash* dan *slag boiler* terdiri dari senyawa SiO₂ sebesar 52,129%, CaO sebesar 12,936%, Al₂O₃ sebesar 12,234% dan Fe₂O₃ sebesar 10,516%.
3. Unsur penyusun sampel geopolimer terbaik berbahan *fly ash* dan *slag boiler* terdiri dari unsur O sebesar 47,98%, C sebesar 37,47%, Si sebesar 6,90%, Al sebesar 3,63%, Na sebesar 2,51%, Ca sebesar 0,55%, K sebesar 0,41% dan Mg sebesar 0,54%. Semakin bertambahnya suhu dan waktu, semakin besar persentasi Si. Hal ini membuat kualitas geopolimer semakin bagus.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mortar geopolimer dengan berbagai macam variasi komposisi, konsentrasi molaritas, suhu dan waktu pemanasan yang berbeda untuk mengetahui mortar geopolimer dengan kualitas yang baik.
2. Diharapkan penelitian geopolimer berbahan *fly ash* dan *slag boiler* berikutnya dapat meneliti aspek lain seperti kuat tarik belah dan kuat lentur.

DAFTAR PUSTAKA

- Adjei, S., Elkatatny, S., Aggrey, W.N, and Abdelraouf, Y. 2022. Geopolymer as the future oil-well cement: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Vol. 208. Pp. 3-5.
- Amin, M dan Suharto. 2017. Pembuatan Semen Geopolimer Ramah Lingkungan Berbahan Baku Mineral Basal Guna Menuju Lampung Sejahtera. *Jurnal Kelitbangan*. Vol. 05. No. 01. Hal 30-45.
- Amin, M., Birawidha, D.C., Isnugroho, K., Hendronursito, Y., dan Septiana, R. 2019. Pengaruh Pemakaian Sodium Hidroksida (NaOH) Pada Pembuatan Geopolimer Menggunakan Material Perlit, Basalt, Feldspart. *Inovasi Pembangunan-Jurnal Kelitbangan*. Vol. 07. No. 01. Hal 97-115.
- Amritphale, S.S., Bhardwaj, P., and Gupta, R. 2019. *Advanced Geopolymerization Technology*. IntechOpen. Pp. 1-8.
- Arifin, I.A. 2018. Pengaruh Substitusi Limbah Marmer Pada Fly Ash Terhadap Kuat Tkan dan Porositas Beton Geopolimer Pada Molaritas 10M. *Rekayasa Teknik Sipil*. Vol. 01. No.1. Hal 16-23.
- Ariffin, M.A.M., Hussin, M.W., dan Bhutta, M.A.R. 2011. Mix Design and Compressive Strength of Geopolymer Concrete Containing Blended Ash from Agro-Industrial Wastes. *Advanced Materials Research*. Vol. 339. Pp. 452-457.
- ASTM C 618: *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International. West Conshohocken. PA. USA. <https://www.astm.org/c0618-22.html>

- Bakri, A. M. M, A., Kareem, O. A. K. A. A., dan Myint, S. 2011. Study on the Effect of the Alkaline Activators Ratio in Preparation of Fly Ash-Based Geopolymer. *Ipcbee*. Vol. 10. No. 2. Pp. 13-17.
- Brouwer, P. 2010. *Theory of XRF: Getting Acquainted with The Principles*. PANalytical BV. Almelo. The Netherlands. Pp. 21-28.
- Davidovits, J. 1999. *Chemistry of geopolymer systems, terminology*. In Proceedings of Geopolymer 99 International Conferences, France. Pp. 17-39.
- Davidovits, J. 2020. *Geopolymer Chemistry and Applications 5th Edition*. Institute Geopolymere. France. Pp. 1-37.
- Davidovits, J. 2005. *Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions*. In Proceedings of The World Congress Geopolymer 2005, Geopolymer Institute. France. Vol. 1. Pp. 9-17.
- Fansuri, H. 2010. *Modul Pelatihan Operasional XRF*. Laboratorium Energi dan Rekayasa. LPPM ITS. Surabaya. Hal 3-5.
- Giancoli, D.C. 2005. *Physics Principles with Applications*. Pearson, Prentice Hall. New Jersey. Pp. 252-255.
- Gultekin, A., dan Ramyar, K. 2022. Effect of curing type on microstructure and compressive strength of geopolymer mortars. *Ceramics International*. Vol. 48. Pp. 16156-16172.
- Hardjito, D. 2005. *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Curtin University of Technology, Perth, Australia. Pp. 6-9.
- Hardjito, D dan B.V. Rangan. 2005. *Developments and Properties of Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. Curtin University of Technology, Perth, Australia. Pp. 5-9.
- Hager, I., Sitarz, M., dan Mroz, K. 2021. Fly-Ash Based Geopolymer Mortar for High-Temperature Application- Effect of Slag Addition. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 316. Pp. 9-16.

- Hussin, M.W., Bhutta, M.A.R., Azreen, M., Ramadhansyah, P.J., dan Mirza, J. 2014. Performance of Blended Ash Geopolymer Concrete at Elevated Temperatures. *Materials and Structures Rilem*. Vol. 48. Pp.709–720.
- Huseien, G.F., Faridmehr, I., Nehdi, M.L., Abadel, A.A., Aiken, T.A., and Ghosal, S.K. 2022. Structure, Morphology and Compressive Strength of Alkali-Activated Mortars Containing Waste Bottle Glass Nanoparticles. *Construction and Building Materials*. Vol 342. No. 2. Pp. 57-74.
- Irawati, N., Putri, T. N., dan Herryandie, A. B. A. 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. Hal. 176-191.
- Islami, A.N., Wibisono, M., dan Saputra, E. 2015. Sifat-sifat Mortar Geopolimer dengan Bahan Dasar Campuran Abu Terbang (*Fly Ash*) dan Abu Sawit (*Palm Oil Fuel Ash*). *Jom FTEKNIK*. Vol. 2. No. 2. Hal 1-10.
- Inkson, B.J. 2016. *Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) for Materials Characterization*. Pp. 17-43.
- John, S.K., Nadir, Y., and Giriya, K. 2021. Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review. *Construction and Building Materials*. Vol. 280. Pp. 277-285.
- Juwita, L. 2003. Karakterisasi Material Menggunakan XRF, XRD dan SEM-EDX. *Jurnal Teknik- Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*. Vol. 2. No. 2. Hal 178-185.
- Kasyanto, H. 2012. Tinjauan Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash* Dengan Aktivator Natrium Hidroksida dan Natrium Silikat. *Industrial Research Workshop and National Seminar*. ISBN 978-979-3541-25-9. Hal 257-259.
- Lahoti, M., Wong, K.K., Tan, K.H., and Yang, E.H. 2018. Effect of Alkali Cation Type on Strength Endurance of Fly Ash Geopolymers Subject to High Temperature Exposure. *Materials & Design*. Elsevier. Vol. 154. Pp. 8-19.

- Marthinus, A.P., Sumajouw, M.D.J., dan Windah, R.S. 2015. Pengaruh Penambahan Abu Terbang (*Fly Ash*) Terhadap Kuat Tarik Belah Beton. *Jurnal Sipil Statik*. Vol.3. No.11. Hal 729-736.
- Newbury, D.E. dan Ritchie, N.W.M. 2013. Is Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectrometry (SEM-EDS) Quantitative. *Scanning*. Vol. 35. No. 3. Pp. 141-168.
- Olivia, M., 2005. Pemanfaatan Abu Sawit Sebagai Bahan Tambah Pada Beton. *Jurnal Sains dan Teknologi 4*. Vol 4. No.1. Hal 10–15.
- Olivia, M. 2011. *Durability Related Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. Curtin University of Technology. Pp. 13-14.
- Ridha, M., dan Darminto, D. 2016. Analisis densitas, porositas, dan struktur mikro batu apung Lombok dengan variasi lokasi dan kedalaman. *Jurnal fisika dan aplikasinya*. Vol. 12. No. 3. Hal 124-130.
- Salain, I.M.A.K., Wiryasa, M.N.A., dan Pamungkas, I.N.M. 2020. Kuat Tekan Beton Geopolimer Menggunakan Abu Terbang. *Jurnal Spektran*. Vol. 9. No. 1. Hal 105-114.
- Setiawati, M. 2018. *Fly ash* sebagai bahan pengganti semen pada beton. *Jurnal UMJ Semnastek*. P-ISSN: 2407-1846. Hal 1-8.
- Shill, S.K., Deen, S.A., Ashraf, M., and Hutchison, W. 2020. Resistance of fly ash based geopolymer mortar to both chemicals and high thermal cycles simultaneously. *Construction and Building Materials*. Vol. 239. Pp. 5-20.
- Singh, N.B., Saxena, S.K., and Gautam, M.K. 2018. Effect of nanomaterials on the properties of geopolymer mortars and concrete. *Materials Today Proceedings*. Vol. 5. No. 3.
- Singh, N.B. 2018. Fly Ash Based Geopolymer Binder: A Future Construction Material. *Journal Minerals*. Vol. 8. No.7. Pp. 299.
- Sumajouw, M.D.J dan Dapas, S.O. 2013. *Elemen Struktur Beton Bertulang Geopolymer*. Penerbit Andi. Yogyakarta. Hal 15-20.

- Syarif, H.A., Rahmi, A., dan Ariyanto, A. 2022. Kuat Tekan dan Absorpsi Mortar Geopolimer Abu Sawit *Portland Composite Cement* dengan Variasi Suhu Tinggi. *Jurnal APTEK*. Vol 15. No. 1. Hal 34-41.
- Thesman, C. 2020. *Pabrik Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dari Pasir Silika dan NaOH dengan Kapasitas 80.000/tahun*. Skripsi. Universitas Surabaya. Hal 30-42.
- Toniolo, N and Boccaccini, A.R. 2017. Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International*. Vol. 43.
- Viklund, A. 2008. Teknik Pemeriksaan Material Menggunakan XRF, XRD dan SEM-EDS. *Jurnal Sains*. ITB, Bandung. Hal. 288-290.
- Yusuf, M.O., Johari, M.A.M., Ahmad, Z.A., and Maslehuudin, M. 2014. Strength and Microstructure of Alkali-Activated Binary Blended Binder Containing Palm Oil Fuel Ash and Ground Blast-Furnace Slag. *Construction and Building Materials*. Vol 52. Pp. 504-510.
- Yanuari, R., Ikrammullah, M., Septari, D., Wijaya, M.F., dan Olivia, M. 2020. Studi Parametrik Mortar Geopolimer *Hybrid* Abu Sawit (*Palm Oil Fuel Ash/POFA*). *Rekayasa Sipil*. Vol 14. No.2. Hal 83-90.
- Zhuang, X.Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C.H., Tong, D.S., Yang, H.M., Yu, W.H., and Wang, H. 2016. Fly Ash-Based Geopolymer: Clean Production, Properties and Applications. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 125. Pp. 253-267.