

**PENGARUH VARIASI SUHU DAN RASIO *FLY ASH* - *SLAG* LIMBAH  
*BOILER* PADA PEMBUATAN MORTAR GEOPOLIMER  
MENGUNAKAN AKTIVATOR NaOH DAN KOH**

(Skripsi)

Oleh

**Hania Fahrani  
1917041014**



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

### PENGARUH VARIASI SUHU DAN RASIO *FLY ASH* - *SLAG* LIMBAH *BOILER* PADA PEMBUATAN MORTAR GEOPOLIMER MENGGUNAKAN AKTIVATOR NaOH DAN KOH

Oleh

HANIA FAHRANI

Mortar geopolimer adalah material konstruksi ramah lingkungan dengan mensintesis bahan yang mengandung banyak alumina dan silika. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui pengaruh variasi suhu dan rasio *fly ash* – *slag* limbah *boiler* dengan penambahan aktivator NaOH dan KOH serta penentuan kelayakan *fly ash* dan *slag* limbah *boiler* sebagai bahan dalam pembuatan mortar geopolimer. Semua material dihaluskan dan diayak, lalu dicampur, kemudian dicetak dengan cetakan kubus 5x5x5 cm<sup>3</sup> dan dibiarkan selama 24 jam. Setelah itu sampel dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam, kemudian dipanaskan menggunakan oven pada suhu 60°C dan 80°C selama 12 jam, untuk selanjutnya dilakukan pengujian (Uji Fisis dan Uji Mekanis) serta dikarakterisasi (XRF, XRD, SEM-EDS). Berdasarkan hasil penelitian didapatkan hasil yang optimum untuk aktivator NaOH yaitu pada sampel I pada suhu pemanasan 60°C diperoleh kekuatan tekan optimal: 17,92 MPa, massa jenis: 1,89 g/cm<sup>3</sup>, porositas: 0,39%, dan absorpsi: 0,21%. Sedangkan untuk aktivator KOH yaitu pada sampel I pada suhu pemanasan 60°C diperoleh kekuatan tekan optimal: 18,12 MPa, massa jenis: 1,95 g/cm<sup>3</sup>, porositas: 0,42%, dan absorpsi: 0,22%. Hasil uji XRF yang optimum yaitu 51,57% SiO<sub>2</sub>, 11,18% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 12,94% CaO, dan 8,65% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Hasil uji XRD menghasilkan fase dominan berupa *quartz*, *violarite*, *anorthite*, dan *diopside*. Hasil *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan permukaan berbentuk bongkahan kristal tidak beraturan dan tidak banyak menghasilkan pori-pori, sehingga memiliki nilai kuat tekan tinggi. Geometri yang dihasilkan memiliki ciri khas fasa mulit, yaitu bahan aluminosilikat dengan rumus kimia 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>. Serta unsur yang terdeteksi dengan EDS yaitu C, O, Si, Na, Al, Fe, Ca, P, Mg, dan Zr dan unsur yang paling dominan dalam penyebaran adalah Si dan Al.

**Kata kunci:** aktivator, geopolimer, karakterisasi, komposisi, mortar, pemanasan

## **ABSTRACT**

### **THE EFFECT OF TEMPERATURE VARIATION AND RATIO OF FLY ASH - SLAG BOILER WASTE ON GEOPOLIMER MORTAR PRODUCTION USING NaOH and KOH ACTIVATORS**

**By**

**HANIA FAHRANI**

*Geopolymer mortar is an environmentally construction material by synthesizing materials containing a large amount of alumina and silica. The purpose of this study was to determine the effect of temperature variations and the ratio of fly ash – slag boiler waste with the addition of NaOH and KOH activators and to determine the feasibility of fly ash and slag boiler waste as ingredients in the manufacture of geopolymer mortar. All material was mashed and sieved, then mixed, then printed with a 5x5x5 cm<sup>3</sup> cube mold and left for 24 hours. After that the samples were dried at room temperature for 24 hours, then heated using an oven at 60 °C and 80 °C for 12 hours, for further testing (Physical Testing and Mechanical Testing) and characterization (XRF, XRD, SEM-EDS). Based on the research results, the optimum results for the NaOH activator were obtained, namely sample I at a heating temperature of 60°C obtained optimal compressive strength: 17,92 MPa, density: 1,89 g/cm<sup>3</sup>, porosity: 0,39%, and absorption: 0,21%. As for the KOH activator, namely sample I at a heating temperature of 60°C, the optimal compressive strength was obtained: 18,12 MPa, density: 1,95 g/cm<sup>3</sup>, porosity: 0,42%, and absorption: 0,22%. Optimum XRF test results were 51,57% SiO<sub>2</sub>, 11,18% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 12,94% CaO, and 8,65% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The XRD test results yielded the dominant phases in the form of quartz, violarite, anorthite, and diopside. Scanning Electron Microscopy (SEM) results show that the surface is in the form of irregular crystal chunks and does not produce many pores, so it has a high compressive strength value. The resulting geometry has the characteristics of the mulite phase, which is an aluminosilicate material with the chemical formula 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>. As well as the elements detected by EDS namely C, O, Si, Na, Al, Fe, Ca, P, Mg, and Zr and the most dominant elements in the distribution were Si and Al.*

**Keywords:** *activator, characterization, composition, geopolymer, heating, mortar*

**PENGARUH VARIASI SUHU DAN RASIO *FLY ASH* - *SLAG* LIMBAH  
*BOILER* PADA PEMBUATAN MORTAR GEOPOLIMER  
MENGUNAKAN AKTIVATOR NaOH DAN KOH**

Oleh

**HANIA FAHRANI**

**Skripsi**

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

Pada

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



**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2023**

Judul Skripsi : **PENGARUH VARIASI SUHU DAN RASIO  
FLY ASH - SLAG LIMBAH BOILER PADA  
PEMBUATAN MORTAR GEOPOLIMER  
MENGUNAKAN AKTIVATOR NaOH DAN  
KOH**

Nama Mahasiswa : **Hania Fahrani**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1917041014**

Program Studi : **Fisika**

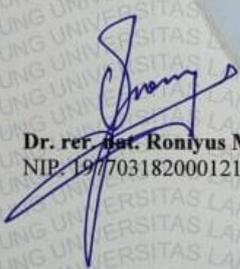
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

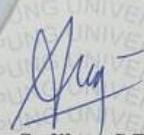


1. Komisi Pembimbing

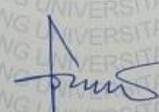
Pembimbing I

Pembimbing II

  
Dr. rer. Nat. Roniyus Marjunus, M.Si.  
NIP. 197703182000121003

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

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

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

**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si.**

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

Penguji Bukan Pembimbing : **Suprihatin, S.Si., M.Si.**

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



**Dr. Ing. Heri Satria, S.Si., M.Si.**  
NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **25 Mei 2023**

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya orang lain dan tidak terdapat 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 ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 25 Mei 2023

Penulis,



Hania Fahrani  
NPM. 1917041014

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Hania Fahrani, dilahirkan pada tanggal 22 Oktober 2001 di Sumberejo. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Jumadi dan Ibu Nasipah. Pendidikan yang telah ditempuh oleh penulis adalah SD Negeri 1 Sumberejo pada tahun 2013, SMP Negeri 2 Sumberejo pada tahun 2016, SMA Negeri 1 Sumberejo pada tahun 2019. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2019 melalui jalur SNMPTN. Penulis telah menyelesaikan kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT Perkebunan Nusantara VII Unit Bekri, Lampung Tengah pada tahun 2022. Penulis juga telah mengikuti program pengabdian masyarakat dengan mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada tahun 2022 di Pekon Argopeni, Kecamatan Sumberejo, Kabupaten Tanggamus. Penulis melakukan penelitian di Laboratorium Non Logam Pusat Riset Teknologi Pertambangan (PRTP-BRIN), Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung dengan judul “Pengaruh Variasi Suhu dan Rasio *Fly Ash – Slag* Limbah *Boiler* pada Pembuatan Mortar Geopolimer Menggunakan Aktivator NaOH dan KOH”. Selama menempuh pendidikan, penulis aktif menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) di bidang sosial masyarakat pada tahun 2020-2021 dan Unit Kegiatan Mahasiswa Saintek (UKM Saintek) Universitas Lampung di bidang komunikasi dan informasi pada tahun 2020-2021.

## MOTTO

مَنْ جَدَّ وَجَدَ

*“Barangsiapa siapa bersungguh-sungguh, pasti akan mendapatkannya”*

[2:286]

**“Kunci kesuksesan seseorang adalah “sabar” disertai usaha yang maksimal dan jangan lupa “doa” karena suatu proses yang diawali dengan kegagalan belum tentu selamanya akan gagal”**

**(Hania Fahrani)**

## **PERSEMBAHAN**

**Dengan rasa syukur kepada Allah SWT, karya ini dipersembahkan  
kepada:**

### **Bapak Jumadi dan Ibu Nasipah**

Terimakasih untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan demi  
keberhasilanku tak lupa adikku yang selalu memberikan semangat dalam  
menyelesaikan skripsi ini hingga mampu menyelesaikan Pendidikan di tingkat  
Universitas sebagai Sarjana Fisika

### **Keluarga Besar & Teman-teman**

Terimakasih atas segala dukungan yang telah diberikan sehingga dapat tetap  
bertahan dalam keadaan suka maupun duka

### **Almamater Tercinta**

Universitas Lampung

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberi nikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Suhu dan Rasio *Fly Ash* – *Slag* Limbah *Boiler* pada Pembuatan Mortar Geopolimer Menggunakan Aktivator NaOH dan KOH”** yang merupakan syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Skripsi ini membahas tentang pengaruh rasio *fly ash* – *slag* limbah *boiler* sebagai pengganti semen pada pembuatan mortar geopolimer kemudian diuji fisis dan dikarakterisasi menggunakan XRF, XRD, dan SEM-EDS.

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

Bandar Lampung, 25 Mei 2023

Hania Fahrani

## SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberi kesehatan, hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Suhu dan Rasio *Fly Ash* – *Slag Limbah Boiler* pada Pembuatan Mortar Geopolimer Menggunakan Aktivator NaOH dan KOH”**. Terwujudnya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si. sebagai Pembimbing Utama yang tulus mengajari dan membantu penulis, membimbing, memberi pemahaman dan nasihat.
2. Bapak Dr. Sudiby, S.T., M.Sc. selaku Pembimbing Kedua yang telah memberikan saran, masukan dan arahan dalam penulisan skripsi ini.
3. Bapak Muhammad Amin, S.T. selaku Pembimbing Lapangan yang telah membantu selama proses penelitian ini.
4. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si. selaku Penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan selama penulisan skripsi.
5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.

7. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si. selaku Pembimbing Akademik yang memberikan masukan-masukan serta nasehat selama masa studi di Jurusan Fisika.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat selama perkuliahan.
9. Kedua orang tuaku Bapak Jumadi dan Ibu Nasipah, serta adikku Halisa Alkayla yang telah mendo'akan dan memberikan semangat serta dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. Farhan Hibatullah yang menemani setiap proses penulis dan memberikan semangat serta motivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
11. Teman-temanku Afifah, Indriya, Ida, Zaidan, Dilla, Leni, Fidhea, Lis Dwi, dan Amapel yang telah kebersamai, membantu, serta memberi semangat dan tempat bercerita keluh kesah.
12. Serta teman-teman seperjuangan Fisika 2019.

Akhir kata, penulis haturkan do'a, semoga Allah SWT memberikan imbalan yang berlipat atas bantuan semua pihak dan semoga Allah SWT selalu memudahkan langkah kita yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 25 Mei 2023

Hania Fahrani

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>HALAM JUDUL</b> .....	iii
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	v
<b>PERNYATAAN</b> .....	vi
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	vii
<b>MOTTO</b> .....	viii
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	ix
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	x
<b>SANWACANA</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xviii
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Batasan Masalah .....	5
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Geopolimer .....	6

2.2 Alkali Aktivator .....	7
2.2.1 <i>Fly Ash</i> (FA) .....	9
2.2.2 Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) .....	10
2.3 Uji Fisik .....	11
2.3.1 Massa Jenis .....	11
2.3.2 Porositas .....	12
2.3.3 Absorpsi (Penyerapan) .....	13
2.4 Uji Mekanis .....	13
2.5 Karakterisasi Material .....	14
2.5.1 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	14
2.5.2 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) .....	16
2.5.3 <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy</i> (SEM-EDS) .....	18

### III. METODE 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 Percobaan .....	23
3.3.1 Preparasi Sampel .....	23
3.3.2 Tahap Pembuatan Geopolimer .....	25
3.4 Diagram Alir .....	26

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Uji Fisis Mortar Geopolimer .....	28
4.1.1. Hasil Pengujian Massa Jenis Mortar Geopolimer .....	28
4.1.2. Hasil Pengujian Porositas Mortar Geopolimer .....	31
4.1.3. Hasil Pengujian Absorpsi Mortar Geopolimer .....	34
4.2. Hasil Uji Mekanis Mortar Geopolimer .....	36
4.3. Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) .....	41
4.3.1. Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) Bahan Baku ..	41
4.3.2. Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) Mortar Geopolimer .....	43
4.4. Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	44
4.4.1. Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) pada Mortar Geopolimer Alkali Aktivator NaOH .....	44
4.4.2. Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) pada Mortar Geopolimer Alkali Aktivator KOH .....	50
4.5. Hasil Karakterisasi <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy</i> (SEM-EDS) .....	54
4.5.1. Hasil Karakterisasi (SEM-EDS) pada Mortar Geopolimer Alkali Aktivator NaOH .....	54
4.5.2. Hasil Karakterisasi (SEM-EDS) pada Mortar Geopolimer Alkali Aktivator KOH .....	56

**V. KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1. Kesimpulan ..... 60  
5.2. Saran ..... 61

**DAFTAR PUSTAKA ..... 62**

**LAMPIRAN..... 67**

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1.</b> Skema Difraksi Sinar-X .....	14
<b>Gambar 2.2.</b> Prinsip fluoresensi Sinar-X.....	17
<b>Gambar 2.3.</b> Skema SEM-EDS .....	20
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram Alir Pembuatan Mortar Geopolimer .....	26
<b>Gambar 4.1.</b> Grafik Massa Jenis pada Alkali Aktivator NaOH .....	29
<b>Gambar 4.2.</b> Grafik Massa Jenis pada Alkali Aktivator KOH.....	29
<b>Gambar 4.3.</b> Grafik Porositas ( <i>Po</i> ) pada Alkali Aktivator NaOH.....	31
<b>Gambar 4.4.</b> Grafik Porositas ( <i>Po</i> ) pada Alkali Aktivator KOH.....	32
<b>Gambar 4.5.</b> Grafik Absorpsi ( <i>Ab</i> ) pada Alkali Aktivator NaOH.....	34
<b>Gambar 4.6.</b> Grafik Absorpsi ( <i>Ab</i> ) pada Alkali Aktivator KOH.....	35
<b>Gambar 4.7.</b> Grafik Kuat Tekan ( <i>P</i> ) Pertama pada Alkali Aktivator NaOH .....	37
<b>Gambar 4.8.</b> Grafik Kuat Tekan ( <i>P</i> ) Pertama pada Alkali Aktivator KOH .....	37
<b>Gambar 4.9.</b> Grafik Kuat Tekan ( <i>P</i> ) Kedua pada Alkali Aktivator NaOH .....	38
<b>Gambar 4.10.</b> Grafik Kuat Tekan ( <i>P</i> ) Kedua pada Alkali Aktivator KOH.....	39
<b>Gambar 4.11.</b> Difraktogram XRD Mortar Geopolimer K I N 60.....	48
<b>Gambar 4.12.</b> Difraktogram XRD Mortar Geopolimer K V N 80 .....	49
<b>Gambar 4.13.</b> Difraktogram XRD Mortar Geopolimer K I K 60.....	51
<b>Gambar 4.14.</b> Difraktogram XRD Mortar Geopolimer K V K 80 .....	52
<b>Gambar 4.15.</b> Hasil karakterisasi SEM-EDS Mortar Geopolimer, (a) K I N 60, (b) K V N 80 .....	54
<b>Gambar 4.16.</b> Morfologi Mortar Geopolimer K I N 60.....	55
<b>Gambar 4.17.</b> Morfologi Mortar Geopolimer K V N 80 .....	56
<b>Gambar 4.18.</b> Hasil karakterisasi SEM-EDS Mortar Geopolimer, (a) K I K 60, (b) K V K 80 .....	57

<b>Gambar 4.19.</b> Morfologi Mortar Geopolimer K I K 60.....	58
<b>Gambar 4.20.</b> Morfologi Mortar Geopolimer K V K 80.....	58

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 3.1.</b> Komposisi Pembuatan Geopolimer Pada Alkali Aktivator NaOH	
Suhu 60°C .....	23
<b>Tabel 3.2.</b> Komposisi Pembuatan Geopolimer Pada Alkali Aktivator NaOH	
Suhu 80°C .....	24
<b>Tabel 3.3.</b> Komposisi Pembuatan Geopolimer Pada Alkali Aktivator KOH	
Suhu 60°C .....	24
<b>Tabel 3.4.</b> Komposisi Pembuatan Geopolimer Pada Alkali Aktivator KOH	
Suhu 80°C .....	24
<b>Tabel 4.1.</b> Hasil Karakterisasi XRF <i>Fly Ash</i> dan <i>Slag</i> Limbah <i>Boiler</i> .....	42
<b>Tabel 4.2.</b> Hasil Karakterisasi XRF Unsur Mortar Geopolimer	
Aktivator NaOH .....	43
<b>Tabel 4.3.</b> Hasil Karakterisasi XRF Mortar Geopolimer Alkali	
Aktivator NaOH .....	44
<b>Tabel 4.4.</b> Hasil Karakterisasi XRF Unsur Mortar Geopolimer	
Aktivator KOH .....	45
<b>Tabel 4.5.</b> Hasil Karakterisasi XRF Mortar Geopolimer Alkali	
Aktivator KOH .....	46
<b>Tabel 4.6.</b> Fase XRD mortar geopolimer K I N 60 .....	48
<b>Tabel 4.7.</b> Fase XRD mortar geopolimer K V N 80.....	50
<b>Tabel 4.8.</b> Fase XRD mortar geopolimer K I K 60 .....	51
<b>Tabel 4.9.</b> Fase XRD mortar geopolimer K V K 80.....	52
<b>Tabel 4.10.</b> Fase keseluruhan karakterisasi XRD mortar geopolimer.....	53
<b>Tabel 4.11.</b> Komposisi unsur mortar geopolimer K I N 60 dan K V N 80	
Menggunakan EDS.....	55

<b>Tabel 4.12.</b> Komposisi unsur mortar geopolimer K I K 60 dan K V K 80 Menggunakan EDS.....	57
--	----

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan infrastruktur di seluruh dunia dengan menggunakan semen sebagai bahan pengikat akan menyebabkan meningkatnya produksi, penggunaan, dan kebutuhan semen. Semen dibuat dengan proses pembakaran menggunakan bahan batu bara yang telah melepaskan gas karbondioksida yang sekitar satu ton untuk setiap ton semen yang diproduksi. Secara global produksi semen memberikan sekitar 5-7% dari total emisi karbondioksida ke atmosfer yang menyebabkan pemanasan global. Meningkatnya kebutuhan semen yang tinggi dapat berdampak buruk pada lingkungan (McLellan *et al.*, 2011).

Salah satu cara yang digunakan untuk mendapatkan material beton ramah lingkungan dengan cara mengembangkan polimer silika alumina anorganik yang dinamakan geopolimer. Beton geopolimer dianalisis sebagai beton ramah lingkungan karena pada proses produksinya tidak melalui proses pembakaran, sehingga tidak memancarkan emisi CO<sub>2</sub> ke atmosfer (Li *et al.*, 2004).

Geopolimer terdiri dari bahan alumina silika yang dihasilkan oleh alkali aktif yang bersumber dari senyawa Al dan Si (Siyal *et al.*, 2016). Geopolimer sendiri memiliki sifat amorf hingga *semi-crystalline* yang disintesis dari bahan yang pada umumnya mengandung senyawa SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Bahan geopolimer juga merupakan polimer

anorganik yang disintesis melalui reaksi larutan silikat basa kuat dan sumber Al dan Si (Irani *et al.*, 2017). Namun, geopolimer tidak dapat mereaksikan ikatan antar molekulnya sendiri, akan tetapi membutuhkan senyawa alkali sebagai katalisator dan aktivator ikatan tersebut. Aktivator dari geopolimer sendiri berupa NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Triwulan dan Ekaputri, 2013).

Bahan dasar yang digunakan dalam pembuatan material geopolimer diantaranya bahan-bahan yang banyak mengandung unsur-unsur silika dan alumina (Putra *et al.*, 2014). Material tersebut dapat berupa mineral alami atau produk sampingan industri. Material geopolimer terdiri dari *fly ash*, *bottom ash*, kaolin, *slag*, *rice huks ash*, serta *palm ash* (Singh *et al.*, 2015).

Beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan mortar geopolimer diantaranya yaitu menggunakan bahan utama *fly ash* dan larutan alkali aktivator NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Konsentrasi yang digunakan pada larutan alkali aktivator NaOH sebesar 14 M dan alkali aktivator KOH sebesar 10 M, 12M, dan 14 M. Ukuran spesimen geopolimer yang akan dibuat sebesar 100 × 100 × 100 mm<sup>3</sup> dengan bentuk kubus. Spesimen dikeringkan dalam oven dengan suhu 90 °C selama 24 jam. Kemudian spesimen tersebut dilakukan uji kuat tekan 3, 7, 28 hari menurut BS1881: Part1 16. Hasil dari penelitian ini diperoleh bahwa penggunaan NaOH memberikan waktu 3 dan 7 hari yang lebih besar kekuatan tekan serta pengerasan yang lebih cepat. Sebaliknya, menggunakan KOH menghasilkan 28 hari yang lebih tinggi kekuatan tekan. Selain itu, inklusi simultan 50% NaOH dan 50% KOH menghasilkan penurunan kekuatan tekan. Selanjutnya, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi KOH hingga 14 M menghasilkan

kuat tekan tertinggi, sedangkan rasio berat 1,5 untuk  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  adalah nilai optimum untuk mencapai kuat tekan 7 dan 28 hari tertinggi (Alireza *et al*, 2020).

Selain itu, Kurniawan dan Mokhtar (2021) telah melakukan pengujian variasi lama pemanasan dengan menggunakan benda uji mortar geopolimer dan menggunakan molaritas tinggi yakni 12 dan 14 M. Bahan dasar yang digunakan adalah *fly ash* kelas C. Variasi lama pemanasan yang dilakukan adalah 3 jam, 6 jam, 18 jam, dan 24 jam pada suhu  $60^\circ\text{C}$ . Dimensi benda uji yaitu kubus dengan ukuran sisi 5 cm x 5 cm x 5 cm. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian kuat tekan dengan menggunakan alat tekan (*Compression Machine Test*) yang sesuai dengan standar SNI 03-0691-1996. Pengujian dilakukan pada umur mortar mencapai 3, 7, 14, dan 28 hari. Dalam pembuatan penggunaan alkali aktivator, peneliti mengambil hasil penelitian Nath dan Sarker yang menggunakan perbandingan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan  $\text{NaOH}$  diambil 1,5: 1. Kuat tekan maksimum yang dihasilkan mortar geopolimer 12 M pada usia 28 hari adalah pada lama pemanasan 24 jam dengan suhu  $60^\circ\text{C}$  yaitu sebesar 59,86 MPa. Sedangkan pada mortar geopolimer 14 M adalah pada lama pemanasan 3 jam dengan suhu  $60^\circ\text{C}$  yaitu sebesar 63,66 MPa. Lama pemanasan paling optimum yang didapatkan dari penelitian yaitu 7 jam 12 menit. (Kurniawan dan Mokhtar, 2021).

Berdasarkan studi literatur di atas, dilakukan penelitian pembuatan mortar geopolimer menggunakan bahan utama *fly ash* dan *slag* limbah *boiler*. Penelitian ini dilakukan dengan campuran larutan alkali yaitu  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ , dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  kemudian dicetak berbentuk kubus dengan ukuran  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  dan dikeringkan pada

suhu pengeringan 60°C dan 80°C selama 12 jam. Selanjutnya dilakukan uji fisis dan mekanis yaitu uji massa jenis (pengukuran massa setiap satuan volume benda), uji porositas (persentase dari ruang kosong beton terhadap volume benda), uji absorpsi (menentukan besarnya persentase air yang diserap yang diserap oleh suatu bahan), uji kuat tekan (kemampuan beton untuk menahan tekanan). Karakterisasi yang dilakukan yaitu *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia bahan uji, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui fase kristal pada bahan uji dan *Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS) untuk mengetahui morfologi dari permukaan mortar geopolimer.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi suhu dan variasi komposisi bahan terhadap sifat fisis dan mekanis pada mortar geopolimer, komposisi kimia pada mortar geopolimer dengan karakterisasi XRD, fase yang terbentuk pada mortar geopolimer dengan karakterisasi XRF, dan morfologi mortar geopolimer pada karakterisasi SEM-EDS?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi suhu dan variasi komposisi bahan terhadap sifat fisis dan mekanis pada mortar geopolimer, komposisi kimia pada mortar geopolimer dengan karakterisasi XRD, fase yang terbentuk pada mortar geopolimer dengan karakterisasi XRF, dan morfologi mortar geopolimer pada karakterisasi SEM-EDS.

#### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. *Fly ash* berasal dari PLTU Tarahan, Lampung Selatan.
2. *Slag* limbah *boiler* berasal dari PTPN VII Unit Bekri, Lampung Tengah.
3. Larutan alkali yang digunakan NaOH dan KOH
4. Suhu pengeringan 60°C dan 80°C selama 12 jam.
5. Melakukan uji fisis dan mekanis seperti massa jenis, porositas, absorpsi, dan kuat tekan.
6. Menggunakan karakterisasi XRF, XRD, dan SEM-EDS.
7. Natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) yang digunakan teknis.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai pemanfaatan *slag* limbah *boiler* dan *fly ash* sebagai material alternatif pengganti semen dalam pembuatan geopolimer.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi dibidang industri bahan bangunan.
3. Memberikan pengetahuan baru terhadap perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam pembuatan geopolimer.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

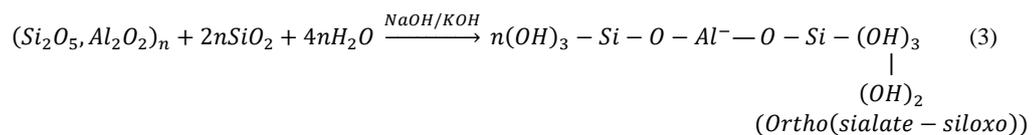
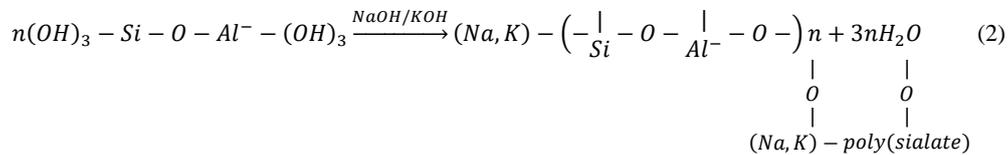
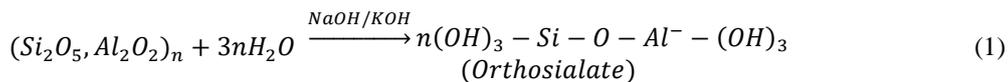
### 2.1 Geopolimer

Geopolimer digunakan sebagai bahan bangunan anti api. Material tersebut kemudian dikembangkan sebagai alternatif substitusi semen dengan menggunakan aktivator silika dan alumina dari limbah industri seperti *fly ash*, abu bahan bakar kelapa sawit, dan abu sekam padi. Proses aktivasi silika dan alumina menggunakan larutan aktivator natrium hidroksida dan natrium silikat. Beton geopolimer abu terbang hibrida adalah campuran pasir, kerikil, air, dan bahan pengikat dari reaksi polimerisasi antara alkali dengan silika dan alumina dari abu terbang dan semen portland sebagai campuran (Yanuari *et al.*, 2021).

Geopolimer adalah senyawa anorganik alumina-silika yang larut dalam bahan yang menggunakan bahan silika (Si) dan Alumina (Al) yang terbuat dari bahan aluminium atau dari bahan yang digunakan dalam industri. Komposisi kimia bahan geopolimer dengan zeolit, yang memiliki struktur mikroamorf (Davidovits, 1999). Geopolimer juga dikenal sebagai reaksi kimia dan pengikat alkali yang diaktifkan kembali dengan terminologi. Beton Geopolimer memiliki pabrik pengolahan sendiri dan pabrik pengolahan permukaan tersebut menggunakan lapisan silikon (Si) dan Alumina (Al) yang memiliki lapisan alkali untuk perawatan permukaan (bahan pengikat) (Tambingon *et al.*, 2018).

## 2.2 Alkali Aktivator

Larutan aktivator adalah larutan yang sangat berperan dalam proses geopolimerisasi. Pada reaksi geopolimerisasi, larutan aktivator memecah bahan alumina silikat menjadi monomer Si dan Al. Larutan aktivator merupakan senyawa atau unsur yang menyebabkan zat yang sudah tercampur menjadi reaksi yang aktif. Pada pembuatan geopolimer, aktivator yang digunakan adalah unsur alkali yang terhidrasi. Penggunaan hidroksida alkali sebagai aktivator reaksi geopolimer dikarenakan unsur silika dalam geopolimer merupakan asam kuat sehingga zat tersebut harus direaksikan dengan basa kuat yang berupa natrium hidroksida (NaOH) (Triwulan *et al.*, 2007).



Larutan aktivator yang sering digunakan adalah kalium hidroksida (KOH). Namun, secara umum kalium hidroksida (KOH) bersifat basa yang mengandung alkali hidroksida, silikat, alumina, karbonat atau sulfat, atau kombinasi dari dua alkali, selain kalium hidroksida (KOH) larutan aktivator terdiri dari natrium hidroksida (NaOH) serta natrium silikat atau kalium silikat. (Deb *et al.*, 2014). Untuk membentuk serbuk aktivator dalam pembuatan semen geopolimer menggunakan

aktivator natrium hidroksida yang dicampur dengan kalsium karbonat (Gawwad dan Abo-el-Enein, 2014).

Binder dibidang beton yang dilepaskan dari *fly ash* dan alkali aktivator oleh natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ).

1. Abu terbang

*Fly ash* merupakan salah satu residu padat yang terdiri dari partikel halus yang dikeluarkan dari boiler dengan gas buang di pembangkit listrik tenaga batu bara.

2. Natrium Hidroksida ( $\text{NaOH}$ )

Natrium hidroksida bekerja untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan polimer yang kuat.

3. Natrium silikat

Natrium silikat yang beredar di pasaran ini merupakan senyawa alkali yang berpengaruh terhadap pelapisan dalam proses polimerisasi (Rumajar *et al.*, 2019).

Pencampuran *fly ash* dengan alkali aktivator menghasilkan bahan pengikat yang umumnya dikenal sebagai pasta geopolimer berbasis abu terbang yang diaktifkan alkali. Salah satu parameter terpenting yang mempengaruhi kekuatan mekanik bahan geopolimer adalah larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  / larutan  $\text{NaOH}$  (Lazarescu *et al.*, 2017) Untuk memilih semen sebagai perekat agregat kasar maupun halus maka digunakan abu terbang. Abu terbang (*fly ash*) adalah limbah yang berasal dari abu pembakaran batu bara. Proses polimerisasi logam alkali oleh reaksi-reaksi geolimerik polimer

logam alkali dengan mineral Si-Al sehingga menghasilkan rantai polimer tiga-dimensi dan struktur Si - O - Al - O konsistensi yang disarankan penggunaan istilah “poli (sialat)” sebagai nama kimia dari beton geopolimer yang berbahan dasar silikon aluminat. Sialat adalah singkatan dari silikon oksoaluminat. Natrium hidroksida mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam abu terbang sehingga dapat menghasilkan polimer yang kuat. Dalam campuran abu terbang dan hidroksida yang diamati dalam ukuran mikrometer, terlihat adanya hubungan yang kurang kuat tetapi lebih padat dan tidak ada retakan seperti pada campuran sodium silikat dan abu terbang (Wardhono, 2019).

### **2.2.1 Fly Ash (FA)**

Komposisi pembakaran batubara menghasilkan 80 - 90 % *fly ash* (FA) dan 10 - 20 % *bottom ash* (BA). Menurut SNI 03-6414-2002, FA merupakan limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar dan bersifat pozolanik. Sementara menurut ASTM C-618, FA didefinisikan sebagai butiran halus residu pembakaran batubara atau bubuk batu bara. FA bervariasi mulai yang lebih kecil dari 1  $\mu\text{m}$  (*micrometer*) sampai yang lebih besar dari 100  $\mu\text{m}$  (beberapa literatur menyebutkan ukuran 0.5  $\mu\text{m}$  – 300  $\mu\text{m}$ ), sebagian besar partikel berukuran < 20  $\mu\text{m}$ . Umumnya hanya sekitar 10 % sampai 30 % ukuran partikel *fly ash* lebih besar dari 50  $\mu\text{m}$ . Luas permukaan FA umumnya berkisar 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  – 500  $\text{m}^2/\text{kg}$  FA, dengan batas bawah 200  $\text{m}^2/\text{kg}$  dan batas atas 700  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

*Specific gravity* FA bervariasi antara 1.6 – 3.1. Pada umumnya *specific gravity* material FA antara 1.9 – 2.55. Massa jenis FA dalam kondisi kering berkisar 540 – 860 kg/m<sup>3</sup>, dan dalam kondisi dengan penggetaran dalam kemasan sebesar 1.120 – 1.500 kg/m<sup>3</sup>. FA batubara mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), fero oksida (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dan kalsium oksida (CaO). Juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO<sub>2</sub>), alkalin (Na<sub>2</sub>O dan K<sub>2</sub>O), sulfur trioksida (SO<sub>3</sub>), fosfor oksida (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) dan karbon. Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat fisik, kimia dan teknis dari FA adalah tipe batubara, kemurnian batubara, tingkat penghancuran, tipe pemanasan dan operasi, metoda penyimpanan dan penimbunan. Pembakaran batubara lignit dan *subbituminous* menghasilkan FA dengan kalsium dan magnesium oksida lebih banyak dari pada bituminus, namun memiliki kandungan silika, alumina, dan karbon yang lebih sedikit dari pada bituminus (Nugraha dan Rolliyah, 2021).

### **2.2.2 Natrium Silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)**

Natrium Silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) atau *waterglass* merupakan kristal putih yang dapat larut dalam air (*soluble glass*) menghasilkan larutan alkali. Terdapat banyak jenis sodium silikat, diantaranya adalah sodium orthosilikat, sodium polisilikat dan sodium pirosilikat. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> selalu stabil dalam larutan murni dan alkali. Dalam larutan asam, ion silikat bereaksi dengan ion hidrogen untuk membentuk asam silikat, yang bila dipanaskan dan dibakar akan membentuk silika gel yang keras, bening seperti zat kaca yang dapat menyerap air dengan cepat (Fairus *et al.*, 2018). Pengaruh Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> pada beton geopolimer adalah meningkatkan kemampuan kerja serta kuat tekan pada beton geopolimer. Peningkatan jumlah Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> mengakibatkan

viskositas semakin tinggi dan proses pembentukan binder semakin cepat. Selain itu, peningkatan kandungan jumlah  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam campuran beton geopolimer menyebabkan peningkatan jumlah  $\text{SiO}_2$  yang mempengaruhi kuat tekan beton (Sengkey *et al.*, 2020).

## 2.3 Uji Fisik

### 2.3.1 Massa Jenis

Massa jenis (*specific gravity*) merupakan rasio volume material pada suhu terhadap berat air dengan volume yang sama pada suhu tersebut (Laoli *et al.*, 2013). Agregat dapat dibedakan berdasarkan massa jenisnya, yaitu agregat normal, agregat berat, dan agregat ringan.

- a. Agregat normal merupakan agregat yang massa jenisnya antara  $2,5 \text{ g/cm}^3$  sampai  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . Agregat ini biasanya berasal dari agregat granit, basalt, dan sebagainya. Beton yang dihasilkan memiliki massa jenis sekitar  $2,3 \text{ g/cm}^3$  betonnya disebut dengan beton normal.
- b. Agregat berat memiliki massa jenis lebih dari  $2,7 \text{ g/cm}^3$  misalnya magnetik ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), barytes ( $\text{BaSO}_4$ ), atau serbuk besi. Beton yang dihasilkan juga massa jenisnya tinggi (sampai  $5 \text{ g/cm}^3$ ), yang efektif sebagai dinding pelindung sinar-X.
- c. Agregat ringan mempunyai massa jenis kurang dari  $2,5 \text{ g/cm}^3$  yang biasa digunakan untuk bangunan non struktural. Akan tetapi dapat pula untuk beton structural atau blok dinding tembok (Tjokrodikuljo, 1996).

Untuk standar pengujian massa jenis digunakan SNI 03-1969-1990. Nilai massa jenis dapat didapatkan dengan menggunakan persamaan (2.1)

$$\rho = \frac{m_k}{m_j - m_a} \times \rho_{air} \quad (2.1)$$

dengan  $\rho$  sebagai massa jenis ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\rho_{air}$  sebagai massa jenis air ( $\text{g/cm}^3$ ),  $m_k$  sebagai massa kering (g),  $m_j$  sebagai massa jenuh (g), dan  $m_a$  sebagai massa ditimbang didalam air (g).

### 2.3.2 Porositas

Porositas merupakan presentase pori-pori atau ruang kosong dalam beton terhadap volume benda (volume total beton). Porositas berhubungan erat dengan permeabilitas beton. Porositas juga dapat diakibatkan adanya partikel-partikel bahan penyusun beton yang relatif besar, sehingga kerapatan tidak maksimal. Porositas menggambarkan besar kecilnya kekuatan beton dalam menopang suatu konstruksi. Semakin padat beton, semakin tinggi tingkat kepadatan maka semakin besar kuat tekan atau mutu beton serta kekuatannya dalam menyangga konstruksi yang lebih berat (Tumingan *et al.*, 2016). Semakin tinggi tingkat kepadatan pada mortar maka semakin besar kuat tekan atau mutu mortar, sebaliknya semakin besar porositas mortar, maka kekuatan mortar akan semakin kecil (Nurwidyanto *et al.*, 2006). Untuk standar pengujian porositas digunakan ASTM C 642-97 dan nilai porositas dapat dihitung dengan persamaan (2.2)

$$Po = \frac{m_j - m_k}{m_j - m_a} \times 100\% \quad (2.2)$$

dengan  $Po$  sebagai porositas (%),  $m_k$  sebagai massa kering (g),  $m_j$  sebagai massa jenuh (g), dan  $m_a$  sebagai massa ditimbang didalam air (g).

### 2.3.3 Absorpsi (Penyerapan)

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya absorpsi antara lain yaitu faktor air semen dan susunan butir (gradasi) agregat (Syamsuddin *et al.*, 2011). Uji daya serap atau absorpsi merupakan uji poros dari semen geopolimer dengan prinsip perendaman dalam air dengan waktu perendaman 24 jam. Nilai penyerapan adalah untuk mengetahui berapa banyak jumlah air yang terserap oleh semen geopolimer. Nilai penyerapan berkaitan dengan nilai porositas dari semen geopolimer, semakin turun juga nilai penyerapan karena semakin turun nilai porositas maka semakin kecil pori-pori yang ada pada semen geopolimer maka semakin sedikit pula rongga kosong yang dapat menyerap sejumlah air (Amin dan Suharto, 2017). Semakin banyak pori-pori yang terkandung dalam beton maka akan semakin besar pula penyerapan sehingga ketahanannya akan berkurang. Rongga (pori) yang terdapat pada beton terjadi karena kurang tepatnya kualitas dan komposisi material penyusunnya (Nurwidyanto *et al.*, 2006). Untuk standar pengujian absorpsi digunakan SNI 03-6433-2000. Persen penyerapan air untuk sampel ini dapat ditentukan oleh persamaan (2.3)

$$Ab = \frac{m_j - m_k}{m_k} \times 100\% \quad (2.3)$$

dengan Absorpsi sebagai nilai absorpsi (%),  $m_k$  sebagai massa kering (g), dan  $m_j$  sebagai massa jenuh (g).

## 2.4 Uji Mekanis

Uji mekanis pada penelitian ini menggunakan uji kuat tekan. Kekuatan tekan adalah kemampuan beton atau mortar untuk menerima gaya tekan persatuan luas. Semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, semakin tinggi pula mutu beton

atau mortar yang dihasilkan. Untuk standar pengujian kuat tekan digunakan SNI 03-6805-2002 dan ASTM C39/C 39M-04a (Swardika *et al.*, 2019). Untuk mengetahui nilai kuat tekan beton dapat dirumuskan dengan persamaan (2.4)

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

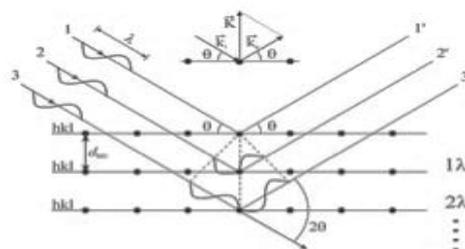
dengan  $P$  sebagai kuat tekan mortar (MPa),  $F$  sebagai beban (N) dan  $A$  sebagai luas permukaan (mm<sup>2</sup>).

Kekuatan tekan pada umumnya diukur pada normal curing sampai umur 28 hari. Nilai kuat tekan diketahui dengan melakukan pengujian kuat tekan terhadap benda uji kubus yang dibebani dengan gaya tekan sampai mencapai beban maksimum. Beberapa faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton geopolimer yaitu jenis material pengikat yang digunakan, molaritas larutan aktivator dan kondisi curing (Ghanes dan Muthukannan, 2021).

## 2.5 Karakterisasi Material

### 2.5.1 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah metode analisis yang memanfaatkan interaksi antara sinar-X jenis karakteristik dengan atom yang tersusun dalam sebuah sistem kristal yang bertujuan untuk meneliti struktur kristalnya (Manurung, 2019). Skema difraksi sinar-X oleh bahan kristal ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



**Gambar 2.1.** Skema Difraksi Sinar-X (Setiabudi *et al.*, 2012).

Apabila sinar-X mengenai suatu material maka intensitas sinar-X yang ditransmisikan akan lebih kecil dari intensitas sinar datang. Hal ini dikarenakan adanya penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar yang dihantarkan tersebut akan saling menguatkan ketika fasanya sama dan saling menghilangkan ketika fasanya berbeda. Berkas sinar yang saling menguatkan disebut sebagai berkas difraksi (Sumantry, 2013).

Sistem difraktometer sinar-X didasari pada Hukum Bragg yang terdiri dari pola intensitas dan sudut difraksi ( $2\theta$ ) yang berbeda-beda dalam setiap material. Hasil difraksi berupa puncak-puncak, terjadi akibat interaksi sinar-X dengan atom-atom pada bidang kristal. Persamaan Hukum Bragg mengenai proses difraksi yang terjadi sebagai hasil interaksi antara sinar-X yang dipantulkan oleh material ditunjukkan pada persamaan (2.5).

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.5)$$

Dengan  $n$  sebagai orde difraksi (0, 1, 2, 3...),  $\lambda$  sebagai panjang gelombang sinar-X ( $\text{\AA}$ ),  $d$  sebagai jarak antar bidang ( $\text{\AA}$ ) dan  $\theta$  sebagai sudut difraksi ( $^\circ$ ) (Setiabudi *et al.*, 2012; Manurung, 2019).

Komponen-komponen utama XRD diantaranya yaitu tabung elektron sebagai tempat terbentuknya sinar-X. Kemudian, monokromator yang berfungsi mengubah berkas polikromatik menjadi berkas monokromatik Selanjutnya yaitu filter berkas polikromatik menjadi berkas monokromatik. Selanjutnya yaitu filter berfungsi menyaring sebagian berkas cahaya yang dapat mengganggu analisa data. Lalu, sampel *holder* sebagai tempat untuk meletakkan sampel yang akan dianalisa Selain itu, komponen lainnya yaitu detektor berguna untuk mendeteksi berkas cahaya yang

terdifraksi pada sudut-sudut tertentu dengan intensitasnya masing masing. Kemudian, *software* yaitu perangkat lunak yang berfungsi menerjemahkan rekaman pada pita menjadi nilai sudut  $2\theta$  yang diubah menjadi pola difaktogram sesuai dengan intensitas yang terdeteksi oleh detektor (Setiabudi *et al.*, 2012).

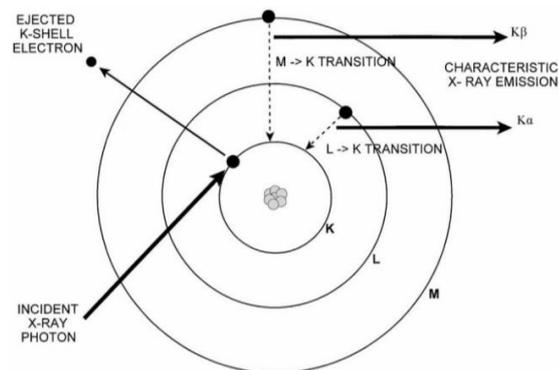
Sebelum melakukan analisis, sampel terlebih dahulu harus disiapkan. Dalam difraktogram, sampel dapat berupa bubuk (*powder*) dan *bulk*. Idealnya, sampel dalam XRD harus dipersiapkan dalam bentuk bubuk. Hal tersebut berkaitan dengan beberapa faktor salah satunya yaitu ukuran butiran bubuk dapat diseragamkan terlebih dahulu. Butiran komponen-komponen dalam suatu campuran dapat membiaskan intensitas difraksi serbuk sinar-X. Hal ini disebabkan oleh efek mikroabsorpsi bahan (Manurung, 2019).

### **2.5.2 X-Ray Fluorescence (XRF)**

*X-Ray Fluorescence* (XRF) adalah teknik analisis non-destruktif yang digunakan untuk mengidentifikasi serta menentukan konsentrasi elemen yang ada pada padatan, bubuk ataupun sampel cair. XRF dapat mengukur elemen dari Berilium (Be) hingga uranium pada level *trace element*, bahkan di bawah level *ppm*. Umumnya, XRF spektrometer mengukur panjang gelombang komponen material secara individu dari emisi *fluorescence* yang dihasilkan sampel ketika diradiasi dengan sinar-X (Setiabudi *et al.*, 2012).

Analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) adalah salah satu contoh analisis yang didasarkan pada perilaku atom yang terkena radiasi. Interaksi atom dengan cahaya dapat menyebabkan berbagai fenomena yang dipengaruhi oleh kuatnya intensitas

cahaya yang berinteraksi dengan atom tersebut. Ketika cahaya yang memiliki energi tinggi (misalnya sinar-X) berinteraksi dengan material, maka dapat menyebabkan terpentalnya elektron yang berada pada tingkat energi paling rendah pada suatu atom. Akibatnya, atom berada pada keadaan yang tidak stabil. Sehingga, elektron yang berada pada tingkat yang lebih tinggi akan mengisi posisi elektron yang terpental. Proses pengisian posisi elektron pada tingkat energi rendah disebut dengan deksitasi. Proses deksitasi diiringi dengan pemancaran cahaya dengan energi yang lebih kecil daripada energi yang menyebabkan tereksitasinya elektron. Energi yang dipancarkan ini dinamakan radiasi fluoresensi (Setiabudi *et al.*, 2012), Peristiwa tersebut dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



**Gambar 2.2.** Prinsip fluoresensi Sinar-X (Kalnicky, 2001).

**Gambar 2.2** menunjukkan bahwa sinar-X karakteristik diberi tanda sebagai K, L, M, N dan seterusnya untuk menunjukkan kulit mana unsur itu berasal. Sedangkan, *alpha* ( $\alpha$ ), *beta* ( $\beta$ ) dan *gamma* ( $\gamma$ ) dibuat untuk memberi tanda sinar-X itu berasal dari transisi elektron dari kulit yang lebih tinggi. Oleh karena itu  $K\alpha$  adalah sinar-X yang dihasilkan dari transisi elektron kulit L ke kulit K (Sumantry, 2013).

Radiasi fluoresensi memiliki energi yang khas tergantung dari elektron yang tereksitasi dan terdeksitasi pada atom penyusun sebuah material. Kekhasan karakteristik dari radiasi fluoresensi pada setiap unsur ini memungkinkan dapat dilakukannya analisa kualitatif untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang berbeda. Sementara itu, analisa kuantitatif untuk menentukan konsentrasi dari unsur yang dianalisis dapat ditentukan berdasarkan intensitas dari radiasi fluoresensi yang dipancarkan (Setiabudi *et al*, 2012).

Metode XRF dipilih untuk aplikasi di lapangan dan industri untuk kontrol material karena termasuk ke dalam metode yang cepat dan tidak merusak sampel. Berdasarkan 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 tinggi (Jamaluddin dan Tahir, 2016).

### **2.5.3 Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)**

*Scanning electron microscopy* (SEM) adalah instrumen canggih serbaguna yang sebagian besar digunakan untuk mengamati fenomena permukaan material. SEM yang juga dikenal sebagai analisis SEM atau teknik SEM, telah digunakan diberbagai bidang ilmu diseluruh dunia dan dapat dianggap sebagai metode yang efektif dalam analisis bahan organik dan anorganik pada skala nanometer ke mikrometer ( $\mu\text{m}$ ). SEM bekerja pada perbesaran tinggi mencapai 300.000x dan bahkan 1.000.000x (dalam beberapa model modem) dalam menghasilkan gambar dengan sangat tepat dari berbagai material. Detail dan kompleksitas yang tidak

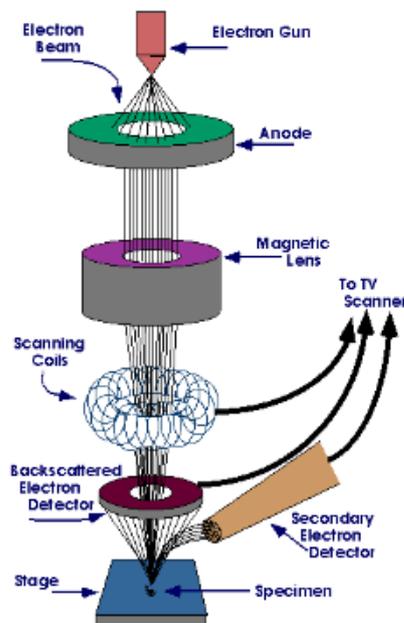
dapat diakses oleh mikroskop cahaya dapat diungkapkan oleh SEM (Mohammed dan Abdullah, 2018).

Sampel ditembak dalam SEM menggunakan elektron berenergi tinggi, dan elektron/sinar-X yang keluar ini memberikan informasi tentang topografi dan morfologi dari suatu material. Morfologi menunjukkan bentuk dan ukuran, sedangkan topografi menunjukkan fitur permukaan suatu objek seperti teksturnya, kehalusan atau kekasarannya. Meskipun SEM digunakan hanya untuk memvisualisasikan gambar permukaan suatu material dan tidak memberikan informasi internal apa pun, SEM masih dianggap sebagai instrumen yang kuat yang dapat digunakan dalam mengkarakterisasi fitur kristalografi, magnet, dan listrik sampel dan dalam menentukan apakah setiap perubahan morfologi partikel telah terjadi setelah memodifikasi permukaan sampel dengan molekul lain. Dengan demikian, SEM merupakan instrumen multiguna yang mampu mengkaji dan menganalisis material dengan resolusi tinggi (Akhtar *et al.*, 2018).

SEM biasanya dilengkapi dengan EDS untuk menangkap *X-Ray* yang dipantulkan oleh elektron. SEM yang umumnya dilengkapi dengan EDS dapat digunakan untuk:

1. Pemeriksaan struktur mikro spesimen metalografi dengan perbesaran hingga 150.000x.
2. Pemeriksaan permukaan patahan dan permukaan yang memiliki kedalaman tertentu yang tidak mungkin diperiksa dengan mikroskop optik.
3. Analisis unsur pada spesimen dalam range mikron pada permukaan bulk spesimen.

4. Distribusi komposisi kimia pada permukaan *bulk specimen* sampai jarak mendekati 1 mikron.



**Gambar 2.3** Skema SEM-EDS (Sumber: iastate.edu, 2009).

EDS merupakan suatu sistem peralatan dan *software* tambahan yang dipasangkan pada suatu mikroskop elektron. EDS dapat digunakan untuk menganalisis semi kuantitatif unsur-unsur dari material. Secara umum EDS dapat digunakan untuk:

1. Menganalisis kontaminan: Analisis inklusi, antarmuka, analisis partikel, pemetaan unsur (elemental mapping), analisis deposit korosi, analisis ketidakmurnian (sampai ketelitian diatas 2% berat).
2. Kontrol kualitas: Analisis pelapisan, verifikasi material, inklus.

(Prasetyo *et al.*, 2012).

SEM-EDS juga dapat digunakan untuk mempelajari sifat-sifat permukaan suatu objek, yang di dalamnya dapat 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. Proses ini menghasilkan energi *X-Ray* tertentu dan menghasilkan perbedaan antara dua energi ikatan pada kulit tersebut. Emisi *X-Ray* dihasilkan dari proses yang disebut 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 (Viklund, 2008).

### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 03 Oktober 2022 sampai dengan 02 Desember 2022 di Laboratorium Non-Logam, Pusat Riset Teknologi Pertambangan Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

#### 3.2 Alat dan Bahan

##### 3.2.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah gelas beaker, timbangan digital, oven, plastik zipper, sarung tangan, *ball mill*, baskom, cetakan kubus ukuran  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ , batang pengaduk, alat uji kuat tekan, *X-Ray Fluoresence (XRF)*, *X-Ray Diffraction (XRD)*, dan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)*.

##### 3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah: *slag* limbah *boiler* berasal dari PTPN VII Unit Bekri, Lampung Tengah, *fly Ash* berasal dari PLTU Tarahan, Lampung Selatan, NaOH 10 M, KOH 10 M,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan air.

### 3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari preparasi sampel dan pembentukan geopolimer.

#### 3.3.1 Preparasi Sampel

Tahapan preparasi sampel pada penelitian ini adalah:

1. *Slag* limbah *boiler* ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi dengan ukuran lolos 100 *mesh*, kemudian dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF).
2. *Fly Ash* ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi dengan ukuran lolos 100 *mesh*, kemudian dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF).
3. Larutan alkali NaOH 10 M (massa NaOH = 400 gram, volume air = 1 liter) dan larutan alkali KOH 10 M (massa KOH = 560 gram, volume air = 1 liter) ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi.
4. Larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi.
5. Air ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi.
6. *Slag* limbah *boiler*, *fly ash*, NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, dan air yang sudah ditimbang dengan masing-masing komposisi presentase, kemudian dicampur dan diaduk menjadi satu sampai rata. Selanjutnya yaitu proses pembuatan geopolimer.

**Tabel 3.1.** Komposisi Pembuatan Mortar Geopolimer pada Alkali Aktivator NaOH Suhu 60°C

Variasi Komposisi	<i>Fly Ash</i>		<i>Slag</i> Limbah <i>Boiler</i>		Rasio	NaOH		Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		Air	
	(%)	(g)	(%)	(g)		(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
K I N 60	40,42	404,2	45,41	454,1	0,89	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K II N 60	45,42	454,2	40,41	404,1	1,12	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K III N 60	50,42	504,2	35,41	354,1	1,42	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K IV N 60	55,42	554,2	30,41	304,1	1,82	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K V N 60	60,42	604,2	25,41	254,1	2,38	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8

**Tabel 3.2.** Komposisi Pembuatan Mortar Geopolimer pada Alkali Aktivator NaOH Suhu 80°C

Variasi Komposisi	<i>Fly Ash</i>		<i>Slag Limbah</i>		Rasio	NaOH		Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		Air	
	(%)	(g)	(%)	(g)		(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
K I N 80	40,42	404,2	45,41	454,1	0,89	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K II N 80	45,42	454,2	40,41	404,1	1,12	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K III N 80	50,42	504,2	35,41	354,1	1,42	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K IV N 80	55,42	554,2	30,41	304,1	1,82	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K V N 80	60,42	604,2	25,41	254,1	2,38	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8

**Tabel 3.3.** Komposisi Pembuatan Mortar Geopolimer pada Alkali Aktivator KOH Suhu 60°C

Variasi Komposisi	<i>Fly Ash</i>		<i>Slag Limbah</i>		Rasio	KOH		Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		Air	
	(%)	(g)	(%)	(g)		(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
K I K 60	40,42	404,2	45,41	454,1	0,89	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K II K 60	45,42	454,2	40,41	404,1	1,12	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K III K 60	50,42	504,2	35,41	354,1	1,42	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K IV K 60	55,42	554,2	30,41	304,1	1,82	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K V K 60	60,42	604,2	25,41	254,1	2,38	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8

**Tabel 3.4.** Komposisi Pembuatan Mortar Geopolimer pada Alkali Aktivator KOH Suhu 80°C

Variasi Komposisi	<i>Fly Ash</i>		<i>Slag Limbah</i>		Rasio	KOH		Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>		Air	
	(%)	(g)	(%)	(g)		(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
K I K 80	40,42	404,2	45,41	454,1	0,89	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K II K 80	45,42	454,2	40,41	404,1	1,12	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K III K 80	50,42	504,2	35,41	354,1	1,42	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K IV K 80	55,42	554,2	30,41	304,1	1,82	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8
K V K 80	60,42	604,2	25,41	254,1	2,38	1,33	13,3	7,66	76,6	5,18	51,8

### 3.3.2 Tahap Pembuatan Geopolimer

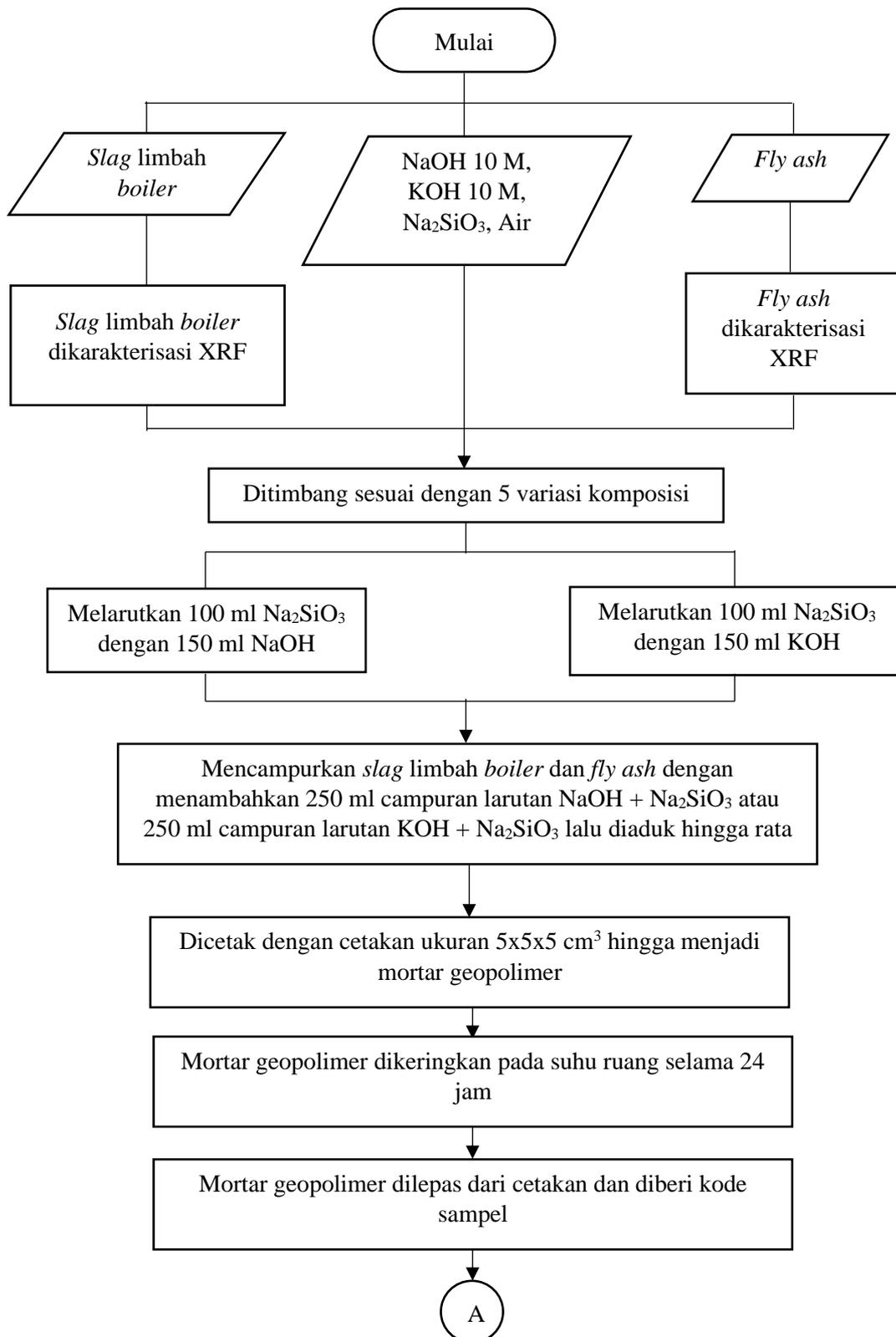
Tahapan pembuatan geopolimer dengan presentase 5 variasi komposisi seperti pada **Tabel 3.1** sampai **Tabel 3.4** adalah:

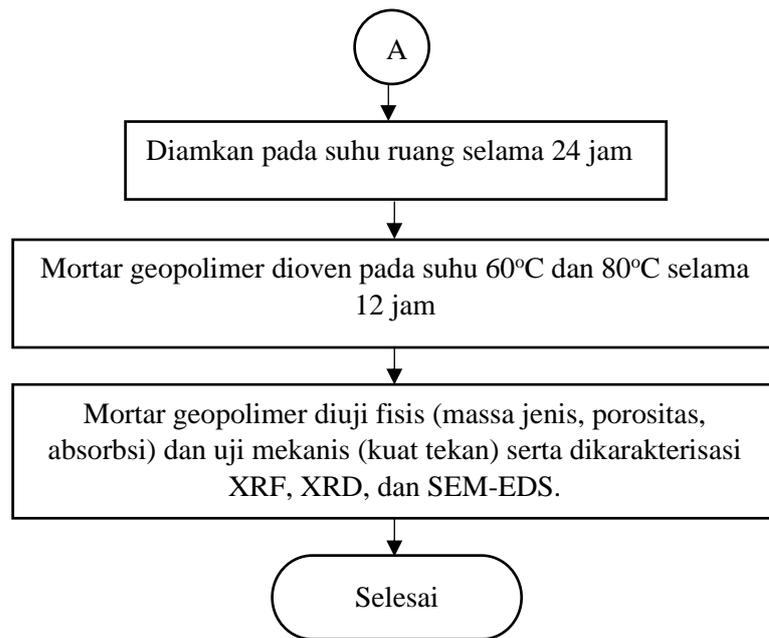
1. Melarutkan 100 ml  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan 150 ml NaOH atau 100 ml  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan 150 ml KOH untuk masing-masing komposisi.
2. Mencampurkan *slag* limbah *boiler* dan *fly ash* dengan menambahkan 250 ml campuran larutan NaOH +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  atau 250 ml campuran larutan KOH +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  kemudian diaduk hingga rata.
3. Mencetak campuran bahan tersebut dengan cetakan kubus berukuran  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  hingga menjadi mortar geopolimer.
4. Mengeringkan mortar geopolimer pada suhu ruang selama 24 jam.
5. Melepas mortar geopolimer dari cetakan dan diberi kode sampel.
6. Mendinginkan pada suhu ruang selama 24 jam.
7. Memanaskan menggunakan oven pada suhu  $60^\circ\text{C}$  dan  $80^\circ\text{C}$  selama 12 jam.
8. Melakukan pengujian dan karakterisasi sampel geopolimer, dengan uji fisis (massa jenis, porositas absorpsi) dan uji mekanis (kuat tekan) serta dikarakterisasi dengan *X-Ray Fluorescence (XRF)*, *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)*.

### 3.4 Diagram Alir

Diagram alir yang dilakukan adalah preparasi bahan pada masing-masing alkali aktif, pembuatan geopolimer pada masing-masing alkali aktif, pengujian fisis (massa jenis, porositas, absorpsi), uji mekanis (kuat tekan) dan karakterisasi

menggunakan XRF, XRD dan SEM-EDS. Adapun diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.1**.





**Gambar 3.1** Diagram Alir Pembuatan Mortar Geopolimer.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan yaitu:

1. Hasil dari uji fisis (massa jenis, porositas, dan absorpsi) dan uji mekanis (kuat tekan) sangat berkaitan, jika nilai massa jenis tinggi maka nilai kuat tekan tinggi dan nilai porositas serta absorpsi rendah. Mortar geopolimer aktivator NaOH pada suhu 60°C diperoleh nilai kuat tekan dan massa jenis tertinggi sebesar 17,92 MPa dan 1,89 g/cm<sup>3</sup>, serta porositas dan absorpsi terendah 0,39% dan 0,21%. Mortar geopolimer aktivator NaOH pada suhu 80°C diperoleh nilai kuat tekan dan massa jenis tertinggi sebesar 11,48 MPa dan 1,88 g/cm<sup>3</sup>, serta porositas dan absorpsi terendah 0,29% dan 0,16%. Mortar geopolimer aktivator KOH pada suhu 60°C diperoleh nilai kuat tekan dan massa jenis tertinggi sebesar 18,12 MPa dan 1,95 g/cm<sup>3</sup>, serta porositas dan absorpsi terendah 0,42% dan 0,22%. Mortar geopolimer aktivator KOH pada suhu 80°C diperoleh nilai kuat tekan dan massa jenis tertinggi sebesar 13,31 MPa dan 1,88 g/cm<sup>3</sup>, serta porositas dan absorpsi terendah 0,67% dan 0,36%.
2. Hasil karakterisasi XRF pada produk mortar geopolimer aktivator NaOH dan KOH menunjukkan bahwa komposisi kimia didominasi oleh senyawa SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan K<sub>2</sub>O.

3. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan fase yang terbentuk pada produk mortar geopolimer aktivator NaOH dan KOH fase yang terbentuk dengan intensitas tertinggi diperoleh pada fasa *Quartz* ( $\text{SiO}_2$ ).
4. Hasil karakterisasi SEM dan EDS pada mortar geopolimer aktivator NaOH dan KOH menunjukkan bahwa penyebaran unsur Si dan Al merupakan penyebaran unsur yang paling dominan, serta morfologi pada produk mortar geopolimer menunjukkan adanya bongkahan yang membentuk fasa kristal pada produk dengan geometri yang memiliki ciri khas dari fasa mulit, yaitu bahan aluminosilikat dengan rumus kimia  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ .

## 5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian, saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Menggunakan bahan baku *fly ash* dan *slag* limbah *boiler* dengan kualitas yang lebih baik lagi dengan memvariasikan komposisi dan suhu pemanasan yang berbeda, yaitu dengan menambahkan waktu 14 jam, 16 jam, dan 18 jam serta suhu di atas  $80^\circ\text{C}$  dalam proses pemanasan menggunakan oven.
2. Melakukan pengawetan produk mortar geopolimer pada suhu ruang tanpa pemanasan dengan waktu penyimpanan 7, 14, 21, dan 28 hari sebelum diuji fisis dan mekanis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akhtar, K., Khan, S. A., Khan, S. B., dan Asiri, A.M. 2018. *S. K. Sharma (ed), Handbook of Materials Characterization, Chapter*. Springer International Publishing AG. Saudi Arabia. Vol. 2. No. 1. Hal. 116.
- Amin, M dan Suharto. 2017. Pembuatan Semen Geopolimer Ramah Lingkungan Berbahan Baku Mineral Basal Guna Menuju Lampung Sejahtera. *Jurnal Kelitbangan*. Vol. 5. No. 1. Hal. 30-45.
- America Society Testing and Material. 2008. *Standard Spesification for Coal Fly Ash and Raw or Calcinated Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM C618-08a. Amerika Serikat.
- 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. Hal. 13–17.
- Deb, P. S., Nath, P., dan Sarker, P. K. 2014. The Effect of Ground Granulated Blast-furnance Slag Blending with Fly Ash and Activator Content on the Workability and Strength Properties of Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. *Materials and Design*. Vol. 62. No. 4. Hal. 3719-3730.
- Esparham, Alireza., Moradikhou, Amir Bahador., dan Avana, Mohammad Jamshidi. 2020. Effect of Various Alkaline Activator Strenght of Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal Civil Engineering Mater*. Vol. 4. No. 2. Hal. 115-123.
- Fairus, S., Haryono, Sugita, M. H., dan Sudarajat, A. 2018. Proses Pembuatan Waterglass dari Pasir Silika dangan Pelebur Natrim Hidroksida. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*. Vol. 8. No.2. Hal. 56-62.
- Gawwad, Abdel H. A dan Abo-el-Enein, S. A. 2014. A Novel Method to Produce Dry Geopolymer Cement Powder. *Housing and Building National Research Center*. Vol 5. No. 3. Hal. 1-12.
- Ghanes, A. C., dan Muthukannan, M. 2021. Development of High Performance Sustainable Optimized Fiber Reinforced Geopolymer Concrete and Prediction

- of Compressive Strength. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 282. No. 2. Hal. 1-13
- Irani, N. Xerses , Suresh G. Patil dan Rampanth. 2017. Experimental Studies of Ambient Cured Geopolymer Concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. Vol. 14. No. 03 Hal 44-49.
- Islami, A. N., Wibisono, M., dan Saputra, E. 2015. Sifat-sifat Fisik Mortar Geopolimer dengan Bahan Dasar Campuran Abu Terbang (*Fly Ash*) dan Abu Sawit (*Palm Oil Fuel Ash*). *Jurnal FTEKNIK*. Vol. 2. No. 2. Hal. 1-10.
- Jamaluddin, Massinai, M. A., dan Tahir, D. 2016. *Analisis Kandungan Logam Oksida Menggunakan Metode XRF (X-Ray Flourescence)*. Pusat Teknologi Bahan Nuklir Batan. No. 09-10/Tahun V. ISSN 1979-2409.
- Kalnicky, D. J. dan Singhvi, R. 2001. Field Portable XRF Analysis of Enviromental Samples. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 83. No. 2. Hal. 93-122.
- Kurniawan, Beny dan Mokhtar Ali. 2021. Pengaruh Pemanasan Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolymer. *Jurnal Seminar Keinsinyuran 2021*. Vol. 1. No.2. Hal. 14-22.
- Lazarescu, A. V., Szilagyi, H., Baera, C., dan Ioani, A. 2017. The Effect of Alakline Activator Ratio on the Compressive Strenght of Fly-Based Geopolymer Paste The Effect of Alkaline Activator Ratio on the Compressive Strenght of Fly Ash-Based Geopolymer Paste. *Journal Materials Science and Engineering, 209*, Hal. 1-16. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/209/1/012064>.
- Laoli, M. E., Kaseke, O. H., Manoppo, M. R. E., dan Jansen, F. 2013. Kajian Penyebab Perbedaan Nilai Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal Panas yang Dihitung Berdasarkan Metode Marshall dengan yang Dicari Langsung Berdasarkan Aastho T209. *Jurnal Sipil Statistik*. Vol. 1. No. 2. Hal. 128-132.
- Li, Z., Ding, Z., dan Zhang, Y. 2004. Development of Sustainable Cementitious Materials. *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Vol.1. No. 2. Hal. 55-76.
- Malau, F. Blasius. 2014. Penelitian Kuat Tekan dan Berat Jenis Mortar untuk Dinding Panel dengan Membandingkan dengan Penggunaan Pasir Bangka dan Pasir Baturaja dengan tambahan Foaming Agent dan Silica Fume. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*. Vol.2. No.2. Hal. 13-20.
- Manurung, Posman. 2019. *Analisis Data Difraksi Sinar-X Edisi Pertama*. AURA. Bandar Lampung.

- Mclellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J. 2011. Cost and Carbon Emissions For Geopolymer Pastes In Comparison atao Ordinary Portland Cement. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 19. No. 6. Hal. 1080-1090.
- Mohammed, A.M dan Abdullah, A. 2018. Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. *International Conference on Hydraulics and Pneumatics*. Vol. 7. No. 3. Hal. 1-9.
- Nugraha, Chandra dan Rolliyah. 2021. *Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash Untuk Pengelolaan Batuan dan Air Asam Di Tambang Batubara*. Direktorat Penilaian Kinerja Pengelolaan Limbah B3 dan Limbah Non B3 Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Jakarta Timur.
- Nurwidyanto, M. I., Meida, Y., dan Sugeng, W. 2006. Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Porositas dan Permeabilitas Pada Batu Pasir. *Jurnal Berkala Fisika*. Vol. 9. No. 4. Hal. 191-195.
- Permata, Estika. F. I. dan Wardhono, Arie. 2022. Pengaruh Kepekatan Larutan Aktivator Terhadap Kuat Tekan Geopolymer Mortar Berbahan Dasar Abu Terbang dan NaOH 12 Molar pada Kondisi SS/SH 2.0 dan 4.0. *Jurnal Rekayasa Teknik*. Vol. 10. No. 1. Hal. 1-14.
- Prasetyo, A., Nafsiati, R., Kholifah, S. N., Botianovi, A. 2012. Analisis permukaan zeolit alam malang yang mengalami modifikasi pori dengan uji SEM-EDS. *Jurnal Saintis*. Vo. 1. No. 2. Hal. 39-46.
- Putra, A. K., Wallah, S., dan Dapas, S. 2014. Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang. *Jurnal Sipil Statik*. Vol. 2 No. 7. Hal. 330-336.
- Rumajar, Rendy James., Sumajouw, Marthin., Pandaleke, Ronny. 2019. Kuat Tarik Lentur Beton Geopolymer Dengan Temperatur Ruangan. *Jurnal Sipil Statik*. Vol. 7 No. 1 Hal. 67-72.
- Samadhi, T. W. dan Pratama, P. P. 2013. Pembuatan Geopolimer Dari Metakaolin dan Abu Terbang. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*. Vol. 11. No. 5. Hal. 265-274.
- Sengkey, S. L., Irmawaty, R., Hustim, M., dan Purwanto. 2020. Pengaruh Alkali Aktivator terhadap Workabilitas dan Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Fly Ash Kelas C. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2020 Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta*. Hal. 101-108.
- Setiabudi, A., Hardian, R., dan Muzakir, A. 2012. *Karakteristik Material Prinsip dan Aplikasinya Dalam Penelitian Kimia*. UPI Press. Bandung.
- Singh, B., G, I., Gupta, M., dan Bhattacharya, S. K. 2015. Geopolymer Concrete : A Review of Some Recent Developments. *Construction and Building Materials*. Vol. 85. No. 5. Hal. 78-90.

- Siyal, A. A., Azizli, K. A, Man, Z dan Ullaah, H. 2016. Effects Of Parameters On The Setting Time Of Fly Ash Based Geopolymers Using Taguchi Method. *Procedia Engineering*. Vol. 148. No. 2. Hal. 302-307.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) S-15-1990-F. 1990. *Persyaratan Mutu Abu Terbang Sebagai Bahan Tambahan Dalam Campuran Beton*. Yayasan LPMB. Bandung
- Sumantry, T. 2013. Aplikasi XRF untuk Identifikasi Lempung Pada Kegiatan Penyimpanan Lestari Limbah Radioaktif. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah VII*. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN. ISSN 14106086.
- Swardika, D. P., Herlina, L., Laely, A., dan Kardin, F. 2019. Pengaruh Rasio Larutan Alkali Aktifator Berbasis Fly Ash Ex PLTU Suralaya Banten. *Prosiding Seminar Intelektual Muda*, September. Vol. 2. No.1. Hal. 314-319.
- Tambingon, Fiki Riki., Sumajouw, Marthin D.J., Wallah, Steenie E. 2018. Kuat Tekan Beton Geopolymer Dengan Perawatan Temperatur Ruangan. *Jurnal Sipil Statik*. Vol. 6 No. 9 Hal. 641-648.
- Triwulan., Januarti Jaya Ekaputri dan Tami Adiningtyas. 2007. Analisis Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly-Ash Dan Lumpur Porong Kering Sebagai Pengisi. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sipil*. Vol. 3. No. Hal. 13-21.
- Tjokrodimuljo, K. 1996. *Teknologi Beton*. Andi. Yogyakarta.
- Tumingan, Tjaronge, M. W., Sampebulu, V., dan Djamaluddin, R. 2016. Penyerapan dan Porositas Pada Beton Menggunakan Bahan Pond Ash Sebagai Pengganti Pasir. *Politeknologi*. Vol. 15. No. 1. Hal. 1-10.
- Triwulan., Januarti Jaya Ekaputri dan Tami Adiningtyas. 2013. Analisa Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly-Ash dan Lumpur Porong Kering Sebagai Pengisi. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sipil*. Vol. 3. No. 1. Hal. 13-21.
- Viklund, A. 2008. *Teknik Pemeriksaan Material Menggunakan XRF,XRD, dan SEM-EDS*. ITB. Bandung.
- Wardhono, Arie. 2019. Pengaruh Kepekatan Larutan Aktivator Terhadap Kuat Tekan Geopolymer Mortar Berbahan Dasar Abu Terbang NaOH 12 Molar Kondisi SS/SH 2.0 dan 4.0. *Jurnal Teknik Sipil*. Vol. 10 No. 1 Hal. 1-14.
- Wibowo, M. T. 2007. Pengaruh penambahan trass muria terhadap kuat tekan, kuat tarik dan serapan air pada mortar. *Skripsi*. Universitas Negeri Semarang. Semarang

Yanuari, J., Septari, D., Rindy, J.A., Olivia, M. 2021. Geopolymer Hybrid Fly Ash Concrete For Construction and Conservation In Peat Environment: A Review. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 847 No. 1 Hal. 12-31.