



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH KONSENTRASI NaOH DAN PENAMBAHAN  
SILICA FUME TERHADAP KARBONASI DAN KEKUATAN  
PASTA GEOPOLIMER**

**TESIS**

**HARY OLYA ADRIANSYAH  
1006803991**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH KONSENTRASI NaOH DAN PENAMBAHAN  
SILICA FUME TERHADAP KARBONASI DAN KEKUATAN  
PASTA GEOPOLIMER**

**TESIS**


**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik**

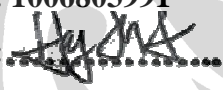
**HARY OLYA ADRIANSYAH  
1006803991**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk telah saya nyatakan dengan benar



Nama : Hary Olya Adriansyah  
NPM : 1006803991  
Tanda Tangan :   
Tanggal : Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Hary Olya Adriansyah



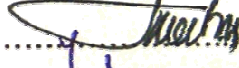

NPM : 1006803991

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Tesis : Pengaruh Kosentrasi NaOH dan Penambahan Silica Fume  
Terhadap Karbonasi dan Kekuatan Pasta Geopolimer

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing	: Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng	(.....  )
Penguji	: Dr. Ir. Donanta Dhaneswara, M.Si	(.....)
Penguji	: Dr.-Ing. Ir. Henki Wibowo A.	(.....  )
Penguji	: Dwi Marta Nurjaya, ST., MT	(.....  )
Penguji	: Ir. Mulia Orientilize, M.Sc	(.....  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2012



## KATA PENGANTAR

Puji syukur dan ucapkan beribu terimakasih hanya kepada Allah, Dzat yang Maha Tinggi dan Agung, yang telah memberikan banyak kemudahan dalam pengerjaan penelitian ini dan tanpa kehendak dari-Nya saya tidak mungkin dapat melewati serangkaian pekerjaan di dalam penelitian ini dengan baik. Adapun penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Magister Teknik Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Ucapan terima kasih juga saya haturkan kepada berbagai pihak atas bimbingan dan bantuannya di dalam penelitian dan penulisan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan banyak terima kasih kepada:

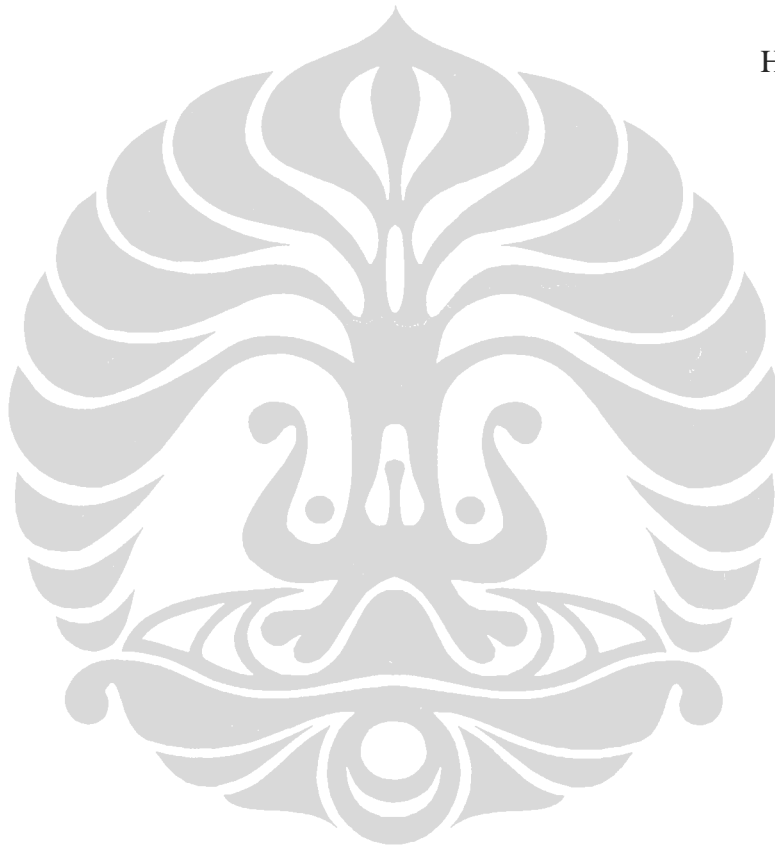
- 1) Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng; terima kasih atas segala sumbangsih baik bimbingan maupun materi yang telah ibu berikan di dalam penelitian saya ini. Semoga Allah membalas dengan keberkahan dan kebaikan dari sisi-Nya.
- 2) Ayah dan Ibu; terima kasih atas do'a-do'a yang terus dipanjatkan sehingga dimudahkan di dalam menyelesaikan penelitian saya ini. Untuk Ayah, semoga Allah memberimu tempat terbaik hingga nanti dibangkitkan kembali. Untuk Ibu, semoga Allah senantiasa melimpahimu nikmat kesehatan dan keselamatan serta keberkahan di dalam hidup.
- 3) Datuak, Ibu, Da Feri dan Wiwi, yang senantiasa memberikan dukungan, inspirasi, semangat untuk terus maju dan menyelesaikan studi ini.
- 4) Teman seperjuangan S2 Teknik Metalurgi dan Material (Ismadi, Giri, Fajar dan Ukin), terimakasih atas kebersamaannya selama mengikuti program S2 Teknik Metalurgi dan Material.
- 5) Segenap karyawan Departemen Metalurgi dan Material; terima kasih telah membantu saya dalam hal-hal yang berkaitan dengan penelitian saya sehingga dapat terselesaikan dengan baik.

Sebagai penutup ucapan terima kasih saya, hanya do'a yang dapat saya panjatkan atas sumbangsih dari pihak-pihak yang telah membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini. Semoga Allah yang Maha Pemurah membalas

setiap kebaikan dengan balasan yang terbaik dari sisi-Nya. Akhir kata, semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 11 Juli 2012

Hary Olya Adriansyah



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hary Olya Adriansyah  
NPM : 1006803991  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengaruh Kosentrasi NaOH dan Penambahan Silica Fume Terhadap Karbonasi dan Kekuatan Pasta Geopolimer.

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat : Depok  
Pada tanggal : 6 Juli 2012  
Yang menyatakan



(Hary Olya Adriansyah)

## ABSTRAK

Nama : Hary Olya Adriansyah  
Program Studi : Departemen Metalurgi dan Material  
Judul : Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Penambahan Silica Fume terhadap Karbonasi dan Kekuatan Pasta Geopolimer

Geopolimer telah mendapat perhatian yang sangat besar sebagai teknologi hijau dalam material konstruksi khususnya beton dan alternatif pengganti semen. Salah satu pengembangan teknologi geopolimer saat ini adalah geopolimer berbahan abu terbang. Proses sintesis geopolimer berbahan abu terbang dalam penelitian ini dilakukan pada konsentrasi larutan NaOH 6,5M, 8,6M, 10,5M dan 12,5M dengan penggantian sebagian kecil abu terbang yaitu 0%, 5%, 10% dan 15% pada temperatur *curing* 60<sup>0</sup>C selama 24 jam. Hasil investigasi menunjukkan bahwa semakin besarnya konsentrasi larutan NaOH maka semakin besar sifat mekanik yang dihasilkan yaitu kekuatan tekan (*compressive strength*) 60,3MPa (12,5M) dan kekuatan lentur (*flexural strength*) 16MPa (10,5M), namun semakin tingginya konsentrasi larutan NaOH juga menyebabkan terbentuknya karbonasi pada pasta geopolimer. Disamping itu, penggantian *silica fume* diharapkan memberikan kekuatan lebih tinggi pada pasta geopolimer berdasarkan rasio Si/Al ternyata tidak sesuai yang diinginkan, kekuatan tekan turun dengan penambahan *silica fume*. Namun demikian, semakin tingginya konsentrasi larutan NaOH membuat kekuatan tekan pada penggantian *silica fume* sebesar 5% pada konsentrasi larutan NaOH 12,5M meningkat menjadi 58,9 MPa.

Kata kunci:

Geopolimer, konsentrasi larutan NaOH, *Silica fume*, kekuatan tekan dan karbonasi

## ABSTRACT

Name : Hary Olya Adriansyah  
Major : Metalurgi dan Material Engineering  
Title : Effect of NaOH Concentration and Silica Fume Addition on the Carbonation and Strength of Geopolymer Pastes

Geopolymers have attracted extensive attention as a green technology in construction materials, especially concrete and cement alternative. One of the current development in geopolymer technology is geopolymers made from fly ash. In this study, synthesis of geopolymer have been performed at concentration of 6,5 M NaOH, 8,6 M, 10,5 M and 12,5M by the replacement of fly ash fraction is 0%, 5%, 10% and 15% with silica fume at 60°C curing temperature for 24 hours. The result of investigation showed that the compressive strength 60,3 MPa (12,5M) and flexural strength 16 MPa (10,5M), but the higher concentration of NaOH causes formation of carbonated in geopolymer paste. In addition, the replacement of silica fume is expected to provide higher strength geopolymer pastes based on the ratio of Si/Al was not desired, the compressive strength decreased with addition of silica fume. However, the higher concentration of NaOH by the replacement of fly ash fraction 5% with silica fume, increased to 58,9 MPa at concentration of 12, 5M NaOH.

Keywords:

Geopolymer, concentration of NaOH, silica fume, compresive strength and carbonation.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Penelitian .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	4
1.4. Ruang Lingkup Penelitian .....	4
1.5. Sistematika Penulisan .....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	6
2.1. Karbonasi .....	6
2.2. Geopolimer.....	8
2.3. Bahan Baku Geopolimer .....	11
2.3.1. Abu Terbang .....	11
2.3.2. Silica Fume .....	12
2.4. Larutan Alkali .....	13
2.4.1. Natrium Hidroksida (NaOH).....	13
2.4.2. Natrium Silikat (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ).....	14
2.5. Metoda Sintesis Geopolimer.....	14
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	16
3.1. Diagram Alir Penelitian .....	16
3.2. Alat dan Bahan .....	17
3.3. Prosedur Penelitian.....	17
3.3.1. Persiapan Abu Terbang .....	17
3.3.2. Karakterisasi Prekursor Geopolimer .....	18
3.3.3. <i>Leaching</i> Pasta Geopolimer dengan <i>Aquades</i> .....	18
3.3.4. Metoda Sintesi Geopolimer .....	18
3.5. Karakterisasi Geopolimer .....	20
3.5.1. Karakterisasi Sifat Mekanik .....	20
3.5.1.1. Kekuatan Tekan .....	20
3.5.1.2. Kekuatan Lentur .....	21
3.5.2. <i>X-ray Diffractometer</i> (XRD) .....	22
3.5.3. <i>X-ray Fluoresence</i> (XRF) .....	22
3.5.4. <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	23
3.5.5. <i>Atomic Absorbption Spectroscopy</i> (AAS) .....	23
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....	24
4.1. Analisis Awal Prekursor Geopolimer .....	24
4.1.1. Abu Terbang .....	24

4.1.2. Silica Fume .....	27
4.2. Analisis Sifat Mekanik .....	28
4.2.1 Kekuatan Tekan .....	28
4.2.2 Kekuatan Lentur .....	31
4.3. Analisis Morfologi Sampel Patahan (SEM).....	32
4.3.1 Morfologi Berdasarkan Kosentrasi Larutan NaOH.....	33
4.3.1.1. Morfologi Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan NaOH 6,5M.....	33
4.3.1.2. Morfologi Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan NaOH 8,6M.....	35
4.3.1.3. Morfologi Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan NaOH 10,5M.....	36
4.3.1.4. Morfologi Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan NaOH 12,5M.....	38
4.3.2 Morfologi Berdasarkan % Silica Fume .....	39
4.3.2.1. Morfologi Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan NaOH 8,6M dengan 5% Sf .....	39
4.3.2.2. Morfologi Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan NaOH 10,5M dengan 5% Sf .....	41
4.3.2.3. Morfologi Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan NaOH 10,5M dengan 10% Sf .....	42
4.3.2.4. Morfologi Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan NaOH 10,5M dengan 15% Sf .....	43
4.4. Analisis Terhadap Karbonasi Pasta Geopolimer.....	44
4.4.1. Analisis AAS .....	44
4.4.2. Analisis FTIR .....	45
4.4.3. Analisis Fasa (XRD).....	47
4.5. Analisis SEM <i>Mapping</i> pada Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan 10,5M dengan 5% Sf .....	50
BAB 5 KESIMPULAN .....	52
DAFTAR REFERENSI .....	54

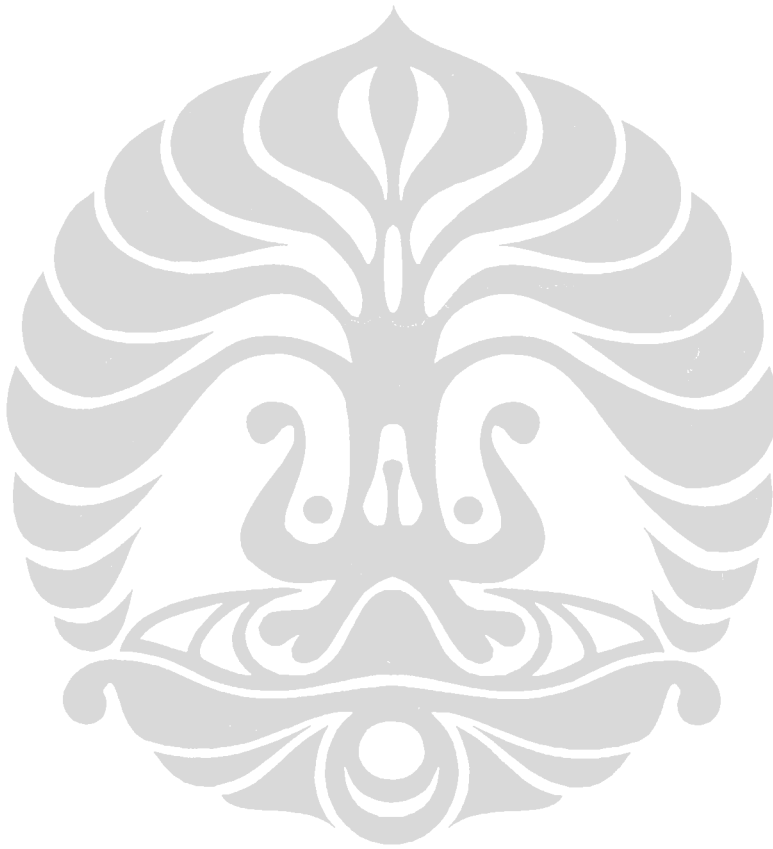
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Karbonasi; a) karbonasi <i>subefflorescence</i> ; b) karbonasi <i>efflorescence</i> .....	8
Gambar 2.2.	Proses geopolimerisasi .....	9
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian .....	16
Gambar 3.2.	Bahan baku dalam proses sintesis geopolimer .....	19
Gambar 3.3.	Gambar mesin uji kekuatan tekan .....	21
Gambar 3.4.	Gambar skema <i>three point bending</i> .....	21
Gambar 3.5.	Gambar mesin uji kekuatan lentur.....	22
Gambar 4.1.	Difraktogram abu terbang.....	26
Gambar 4.2.	Difraktogram silica fume.....	27
Gambar 4.3.	Kekuatan tekan pasta geopolimer terhadap konsentrasi larutan NaOH.....	29
Gambar 4.4.	Kekuatan tekan pasta geopolimer terhadap % silica fume.....	30
Gambar 4.5.	Kekuatan lentur pasta geopolimer terhadap % silica fume .....	31
Gambar 4.6.	Kekuatan lentur pasta geopolimer terhadap konsentrasi NaOH....	32
Gambar 4.7.	Morfologi pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 6,5M dengan 0% Sf.....	34
Gambar 4.8.	Morfologi pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 8,6M dengan 0% Sf.....	36
Gambar 4.9.	Morfologi pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M dengan 0% Sf.....	37
Gambar 4.10.	Morfologi pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 12,5M dengan 0% Sf.....	39
Gambar 4.11.	Morfologi pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 8,6M dengan 5% Sf.....	40
Gambar 4.12.	Morfologi pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M dengan 5% Sf.....	41
Gambar 4.13.	Morfologi pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M dengan 10% Sf.....	42
Gambar 4.14.	Morfologi pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M dengan 15% Sf .....	43
Gambar 4.15.	Spektra IR pasta geopolimer berdasarkan konsentrasi larutan NaOH.....	46
Gambar 4.16.	Spektra IR pasta geopolimer berdasarkan % <i>silica fume</i> .....	47
Gambar 4.17.	Spektra IR pasta geopolimer berdasarkan % <i>silica fume</i> , dan Sf .....	48
Gambar 4.18.	Difraktogram X-ray: abu terbang dan pasta geopolimer dengan 0% Sf dan pasta geopolimer dengan 10% Sf.....	48
Gambar 4.19.	Difraktogram X-ray: pasta geopolimer dan serbuk sisa <i>leaching</i> pada 0% Sf dan 10% Sf .....	49
Gambar 4.20.	SEM <i>Mapping</i> pasta geopolime pada 10,5M pada 5% Sf.....	50



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan Si/Al dan aplikasi .....	10
Tabel 2.2. Komposisi abu terbang jenis F dan C.....	12
Tabel 3.1. Komposisi sintesis pasta geopolimer dalam rasio molar .....	19
Tabel 4.1. Komposisi kimia abu terbang dan silica fume (% wt) pada Pada pengujian XRF.....	25
Tabel 4.2. Hasil uji AAS terhadap Na <sup>+</sup> dan Ca <sup>2+</sup> terlarut.....	44



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil Pengujian Tekan.....	60
Lampiran 2	Perhitungan Tegangan Tekan dan Tegangan Tarik serta Modulus Elastis .....	65
Lampiran 3	Gambar Sampel Pasta Geopolimer.....	72



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Dunia saat ini sedang menghadapi sebuah permasalahan serius berkaitan dengan perubahan iklim akibat meningkatnya emisi gas rumah kaca di atmosfer. Perubahan iklim yang terjadi dipastikan membawa suatu ancaman bagi kehidupan manusia di dunia dan di Indonesia khususnya, sehingga kondisi ini menjadi sebuah topik yang hangat dalam pembahasan di berbagai forum dunia. Keseriusan dalam menanggapi masalah ini adalah dibentuknya sebuah panel antar pemerintah mengenai perubahan iklim (*IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change*) oleh Badan Meteorologi Dunia (*WMO-World Meteorological Organization*) yang bertugas memberikan informasi teknis, sosial, ekonomi yang berkaitan dengan masalah perubahan iklim [1,2]. Salah satu sumber penyebab perubahan iklim akibat emisi gas rumah kaca ini sebesar 76% berasal dari emisi *carbon dioxide* ( $\text{CO}_2$ ) [3,4] dan sebesar 66% dari emisi  $\text{CO}_2$  tersebut berasal dari sektor energi seperti bahan bakar fosil [3]. Data dari IEA (*International Energy Agency*) menunjukkan bahwa total emisi  $\text{CO}_2$  di seluruh dunia pada tahun 2009 sebesar 28.999,4 juta ton sedangkan emisi  $\text{CO}_2$  yang dihasilkan oleh Indonesia pada tahun yang sama sebesar 376,3 juta ton dimana emisi ini naik sebesar 164.7% sejak tahun 1990 [5]. Meningkatnya konsentrasi emisi  $\text{CO}_2$  di atmosfer dari tahun ke tahun akan membawa dampak buruk terhadap keberlangsungan planet bumi dan makhluk hidup yang tinggal didalamnya.

Semakin tingginya konsentrasi emisi  $\text{CO}_2$  ini di atmosfer membuat setiap negara-negara di dunia setuju untuk berkomitmen mengurangi emisi  $\text{CO}_2$  dengan ikut meratifikasi persetujuan dalam sebuah protokol yang dikenal dengan nama protokol kyoto [6]. Tindak lanjut dari persetujuan ini adalah munculnya pengembangan berbagai teknologi baru yang menghasilkan tingkat emisi  $\text{CO}_2$  yang rendah sehingga aman bagi lingkungan. Salah satu teknologi yang ikut memainkan peranan penting dalam menurunkan tingkat emisi  $\text{CO}_2$  adalah teknologi geopolimer. Geopolimer merupakan teknologi yang telah menjadi subyek perhatian khusus dikalangan peneliti

dan industri dalam hal menangani masalah perubahan iklim akibat meningkatnya konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer, teknologi ini menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> yang rendah dalam proses pembuatannya.

Berkaitan dengan emisi CO<sub>2</sub> tersebut, teknologi geopolimer telah menjadikan beton sebagai salah satu aplikasi dalam material konstruksi sebagai alternatif pengganti semen karena dalam proses produksi semen menghasilkan jumlah emisi CO<sub>2</sub> yang tinggi yakni setiap 1 ton semen yang dihasilkan oleh produksi semen akan menyumbangkan 1 ton CO<sub>2</sub> ke atmosfer [7-11]. Berdasarkan data pada tahun 1995 menunjukkan bahwa jumlah produksi semen di seluruh dunia tercatat sebesar 1.5 miliar ton dimana jumlah produksi ini juga menunjukkan besarnya jumlah emisi CO<sub>2</sub> yang dilepaskan ke atmosfer sebesar 1.5 miliar ton [12], dan secara global kontribusi produksi semen menyumbangkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 5-7% [7,13-16]. Sebagai negara yang sedang berkembang dengan jumlah penduduk terbesar no.4 di dunia, jumlah produksi semen Indonesia pada tahun 2009 sebesar 36.9 juta ton [17]. Jumlah produksi ini diyakini akan terus meningkat seiring dengan pembangunan infrastruktur yang sedang dijalankan oleh pemerintah yang juga berarti akan terjadi peningkatan jumlah emisi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan. Melihat kondisi ini teknologi geopolimer mempunyai potensi yang sangat besar untuk dikembangkan lebih lanjut di Indonesia.

Geopolimer adalah polimer anorganik berbahan dasar aluminosilikat (SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang diaktifasi oleh larutan basa kuat [7,18-20]. Teknologi ini pertamakali dikembangkan oleh Josep Davidovits pada tahun 1970-an [21-23], sedangkan pemakaian terminologi dari geopolimer diperkenalkan pada tahun 1978 [7,24,25]. Dalam sintesis geopolimer, material yang dapat digunakan sebagai bahan dasar (prekursor) adalah material yang mengandung unsur utama silika (Si) dan alumina (Al), material tersebut berasal dari mineral aluminosilikat seperti kaolin atau pozolan dan limbah industri yakni *fly ash* (abu terbang). Kedua jenis prekursor inilah yang sering digunakan dalam memahami karakteristik pengembangan geopolimer saat ini [26]. Namun demikian, penggunaan abu terbang sebagai prekursor geopolimer memberikan perhatian khusus karena harganya yang murah dan memiliki sifat

mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan metakaolin serta dapat membantu mengatasi masalah pencemaran lingkungan akibat penumpukan limbah abu terbang.

Salah satu sifat mekanik yang digunakan untuk menilai kualitas geopolimer adalah kuat tekan. Geopolimer berpotensi menghasilkan peningkatan kekuatan tekan dengan cara mengganti sebagian kecil dari prekursor yang digunakan yakni abu terbang dengan prekursor lain yaitu *silica fume* [27]. Proses sintesis geopolimer tersebut dapat menggunakan metoda terpisah karena menghasilkan tingkat kekuatan yang lebih baik [28]. Keuntungan lain dari penggunaan metoda ini adalah mampu mengontrol *workability* dari geopolimer. Namun demikian, peningkatan kekuatan geopolimer dapat dilakukan lebih maksimal dengan meningkatkan konsentrasi larutan NaOH dimana semakin tinggi konsentrasi larutan NaOH di dalam geopolimer maka tingkat disolusi Si dan Al akan semakin baik [21,28-30]. Akan tetapi semakin besarnya konsentrasi molaritas NaOH mengindikasikan terbentuknya karbonat pada geopolimer semakin besar. Proses terbentuknya karbonat pada geopolimer ini disebabkan oleh reaksi sodium ( $\text{Na}^+$ ) dalam konsentrasi tinggi dengan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dimana  $\text{Na}_2\text{O}$  yang reaktif terhadap air dan udara membentuk  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Terbentuknya  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  pada geopolimer dapat mempengaruhi kekuatan dan ketahanan kimia dari geopolimer [9]. Namun pembahasan tentang karbonasi ini belum banyak dilakukan oleh peneliti. Oleh karena itu diperlukan suatu penelitian yang secara komprehensif menginvestigasi pengaruh konsentrasi dan penambahan *silica fume* terhadap karbonasi dan kekuatan pasta geopolimer.

## 1.2. Perumusan Masalah

Karbonasi yang terjadi pada geopolimer merupakan reaksi  $\text{Na}^+$  dengan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dimana  $\text{Na}_2\text{O}$  yang reaktif terhadap air dan udara membentuk  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Terbentuknya  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dapat mempengaruhi kekuatan dan ketahanan kimia pada geopolimer. Namun pembahasan tentang karbonasi pada pasta geopolimer belum banyak dilakukan oleh para peneliti. Oleh karena itu diperlukan penelitian yang lebih lanjut tentang pengaruh kelarutan  $\text{Na}^+$  terhadap kekuatan pada geopolimer

### 1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh konsentrasi NaOH dan penambahan *silica fume* terhadap kekuatan serta terbentuknya karbonasi pada pasta geopolimer. Untuk mencapai tujuan tersebut, maka strategi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh konsentrasi NaOH terhadap terbentuknya karbonasi pada pasta geopolimer berbahan abu terbang.
2. Mengetahui pengaruh penambahan *silica fume* terhadap kekuatan tekan dan nilai kekuatan *flexural* serta terbentuknya karbonat pada pasta geopolimer berbahan abu terbang.

### 1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Proses terbentuknya mekanisme kekuatan pada geopolimer saat ini sudah mulai dipahami oleh kalangan peneliti. Beberapa faktor dalam meningkatkan kekuatan geopolimer telah diteliti dan dilaporkan bisa berpengaruh dalam peningkatan kekuatan pada geopolimer seperti proses sintesis geopolimer secara terpisah dimana proses sintesis dengan menggunakan metoda secara terpisah menghasilkan kekuatan geopolimer yang lebih baik [28]. Sedangkan pemanfaatan limbah dari industri seperti abu terbang dan *silica fume* sebagai prekursor dapat mengurangi pencemaran lingkungan.

Proses curing dilakukan pada temperatur 60°C selama 24 jam akan mempercepat terjadinya geopolimerisasi sedangkan konsentrasi larutan NaOH dalam alkali aktivator untuk pelarutan dan pelepasan Si dan Al pada partikel prekursor abu terbang sebesar 6.5M, 8.5M, 10.5M dan 12.5M meningkatkan kekuatan geopolimer namun akan mengalami penurunan kekuatan akibat adanya karbonasi. Namun dengan penambahan *silica fume* sebesar 5%, 10%, 15% dapat meningkatkan kepadatan dan kekuatan pada pasta geopolimer. Untuk membuktikan pengaruh parameter tersebut terhadap sifat mekanik pasta geopolimer dapat dilakukan melalui pengujian

karakterisasi berupa pengujian tekan, *flexural*, *x-ray Diffraction* (XRD), *scanning electron microscope* (SEM) dan *atomic absorption spectroscopy* (AAS).

### **1.5. Sistematika Penulisan**

#### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Bab ini berisi latar belakang penelitian, perumusan masalah yang dibahas, tujuan dilakukannya penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

#### **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi tentang penjelasan dasar tentang karbonasi, geopolimer, bahan baku geopolimer, larutan alkali, metoda sintesis geopolimer.

#### **BAB 3 METODE PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang diagram alir penelitian, bahan dan peralatan yang digunakan dalam penelitian, karakterisasi geopolimer

#### **BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisikan data hasil pengujian dan pengukuran, karakterisasi serta grafik yang membahas pengaruh konsentrasi larutan NaOH dan % *silica fume* terhadap karbonasi dan kuat tekan pasta geopolimer.

#### **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Karbonasi

Ketahanan (*durability*) terhadap kondisi suatu lingkungan adalah salah satu sifat penting yang harus dimiliki oleh struktur material semen dalam penggunaannya sebagai material konstruksi dan terkaitannya dengan masa pakai [43], terlebih lagi untuk material dengan unsur penyusun yang reaktif terhadap atmosfer CO<sub>2</sub>. Salah satunya ketahanan tersebut adalah ketahanan terhadap karbonasi. Karbonasi merupakan fenomena yang terjadi secara alamiah pada material seperti beton, keramik, batu bata yang dapat merusak struktur permukaan maupun didalam material tersebut. Penyebab dari karbonasi pada umumnya adalah kehadiran unsur logam alkali yang berasal dari lingkungan atau material tidak bereaksi karena memiliki jumlah berlebih. Unsur – unsur tersebut adalah potasium, sodium, kalsium, magnesium dan lain-lain [54].

Fenomena karbonasi juga terjadi pada geopolimer, karbonasi disebabkan oleh prekursor penyusun berasal dari larutan aktivator yaitu sodium (Na<sup>+</sup>) [43]. Namun demikian, proses karbonasi tidak hanya terjadi pada unsur Na<sup>+</sup> tetapi juga dapat berasal dari unsur Ca<sup>2+</sup> dari sumber material seperti abu terbang, biasanya pada abu terbang jenis C yang memiliki kandungan CaO yang tinggi [55]. Chi *et. al* [56] mengatakan bahwa karbonasi merupakan produk dari proses hidrasi dimana unsur Na<sup>+</sup> dalam bentuk natrium oksida (Na<sub>2</sub>O) sedangkan Ca<sup>2+</sup> dalam bentuk kalsium hidroksida (Ca(OH)<sub>2</sub>) ikut terbawa ke permukaan, kontak dengan udara (CO<sub>2</sub>) atau air (H<sub>2</sub>O) membentuk molekul Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan CaCO<sub>3</sub>. Mekanisme dari reaksi karbonasi yang melibatkan Na<sub>2</sub>O dan Ca(OH)<sub>2</sub> seperti terlihat pada reaksi dibawah ini.



Pada reaksi 2.1 menjelaskan proses hidrasi NaOH menghasilkan sodium oksida (Na<sub>2</sub>O) dimana Na<sub>2</sub>O yang dihasilkan sangat reaktif dengan air dan CO<sub>2</sub> sehingga



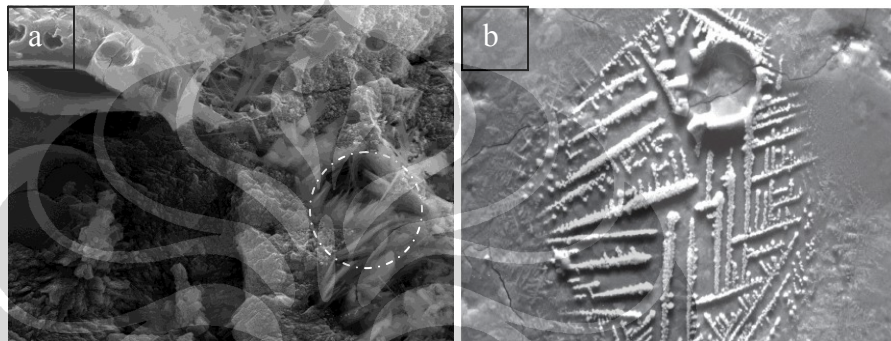
ketika bereaksi dengan  $\text{CO}_2$  di rongga/*void* maupun dipermukaan sampel geopolimer akan membentuk  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  [42] seperti diuraikan pada reaksi 2.2, sedangkan pada unsur  $\text{Ca}^{2+}$  menghasilkan produk hidrasi yang salah satu adalah  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , dimana karbonasi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ini berlangsung dalam 2 tahap yang diawali dengan larutnya  $\text{CO}_2$  ke dalam air membentuk *carbonic acid* ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) kemudian  $\text{H}_2\text{CO}_3$  bereaksi dengan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  membentuk kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) seperti yang ditunjukkan pada reaksi 2.3 dan 2.4 [57].



Terjadinya karbonasi tergantung pada tingkat kelembapan kondisi lingkungan, kepadatan material dan unsur yang menyebabkan terjadinya karbonasi. Temuujin *et. al* melaporkan bahwa karbonasi *efflorescence* tidak terlihat pada sampel geopolimer yang mengalami pengerasan awal dengan pemanasan pada temperatur  $70^0$  C selama 24 jam, namun karbonasi *efflorescence* terlihat pada sampel yang mengalami pengerasan temperatur kamar [58], hal ini bisa terjadi karena proses terbentuknya kekerasan pada temperatur kamar sangat lambat dibandingkan dengan terbentuknya kekerasan dengan proses pemanasan sehingga pada masa proses pengerasan pada temperatur kamar akan lebih mudah masuknya udara ( $\text{CO}_2$ ) dan menyusup melalui pori-pori kapiler, bereaksi membentuk karbonat [29]. Ditambah lagi dengan konsentrasi larutan alkali yang tinggi digunakan dalam proses sintesis geopolimer akan membantu meningkatkan karbonasi yang terjadi, karena akan semakin banyak alkali ( $\text{Na}^+$ ) berlebih yang tidak bereaksi [59]. Disamping itu, kepadatan rendah yang dihasilkan akan membuat  $\text{CO}_2$  mudah menyusup kerongga-rongga pori kapiler geopolimer.

Secara umum, proses karbonasi pada geopolimer dapat dikategorikan menjadi 2 jenis yaitu karbonasi *efflorescence* dan karbonasi *subefflorescence*. Karbonasi *efflorescence* merupakan karbonasi yang terjadi pada permukaan berupa endapan berwarna putih dimana karbonasi ini secara estetika tidak diinginkan karena

mengganggu tampilan permukaan dibandingkan kosenkuensinya terhadap struktur material, karbonasi ini juga dapat terlihat secara kasat mata, sedangkan karbonasi yang terjadi didalam geopolimer terdapat pada rongga/*void* material matriknya dinamakan karbonasi *subefflorescence*, karbonasi jenis ini menyebabkan terjadinya *decalcification* pada rongga/*void* yang akan mengganggu matrik geopolimer [60]. Gambar 2.1 menunjukkan pada geopolimer; karbonasi *subefflorescence* (a) dan karbonasi *efflorescence* (b) .



**Gambar 2.1.** Karbonasi *subefflorescence* (a) dan karbonasi *efflorescence* (b) [61]

Melihat beberapa penyebab dari terbentuknya karbonasi, maka dalam penelitian ini mencoba menelusuri lebih lanjut masalah karbonasi dilihat dari komposisi sintesis pada pasta geopolimer menggunakan 4 formula campuran dengan kosentrasi larutan NaOH yang berbeda yaitu 6,5 M, 8,5 M, 10,5 M dan 12,5 M yang divariasikan dengan menggantikan sebagian peran abu terbang dengan *silica fume* sebesar 0%, 5%, 10% dan 15%. Proses pengerasan (*curing*) terhadap pasta geopolimer dilakukan pada temperatur 60° C selama 24 jam yang dilanjutkan dengan pengerasan dalam temperatur kamar selama 7 hari. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberi gambaran tentang karbonasi pada pasta geopolimer.

## 2.2. Geopolimer

Geopolimer merupakan salah satu teknologi ramah lingkungan (*green technology*) yang saat ini menjadi daya tarik dikalangan peneliti sebagai objek penelitian untuk dikembangkan sebagai alternatif pengganti semen tradisional (OPC), karena memiliki sifat mekanik yang baik terhadap ketahanan kimia [62], memiliki penyusutan yang



*polysialate-siloxo* (-Si-O-Al-O-Si-O-), (3) Si/Al = 3 membentuk *polysialate-disiloxo* (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) [45]. Weng *et. al* mengatakan bahwa proses sintesis geopolimer menggunakan dua jenis aktivator yaitu larutan alkali hidroksida (NaOH) dan larutan alkali silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) akan menghasilkan struktur geopolimer berupa *poly(sialate-siloxo)* dan *poly(sialate-disiloxo)* [68]. Berdasarkan perbandingan rasio Si/Al tersebut, Davidovits juga mengelompokkan aplikasi dari geopolimer yang terbentuk seperti terlihat pada tabel 2.1 dibawah ini.

**Tabel 2.1** Perbandingan Si/Al dan aplikasi [24]

Perbandingan Si/Al	Aplikasi
1	-batu bata -keramik -pelindung api
2 3	-semen dan beton dengan kadar CO <sub>2</sub> rendah -komposit serat gelas tahan api -peralatan pengecoran logam -komposit tahan panas, 200°C hingga 1000°C -alat untuk proses aeronautika titanium
>3	-penutup/segel untuk industri, 200°C hingga 1000°C -alat untuk aeronautika SPF aluminium
20-35	-komposit serat tahan panas dan tahan api

Proses sintesis geopolimer menggunakan 2 jenis bahan baku (prekursor) yaitu sumber material dan larutan alkali. Pada sumber material harus memiliki kandungan utama silika (SiO<sub>2</sub>) dan aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang dapat berasal dari mineral alam seperti kaolin maupun limbah buangan dari industri seperti abu terbang, *silica fume*, ampas biji besi (*blast furnace slag*) dan lain-lain, sedangkan larutan alkali yang digunakan dalam mengaktivasi prekursor geopolimer berupa *sodium hydroxide* (NaOH), *potasium hydroxide* (KOH), *sodium silicate* (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) dan *potasium silicate* (K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>).

Namun demikian, dalam perkembangan geopolimer saat ini penggunaan prekursor geopolimer lebih banyak menggunakan material limbah seperti abu terbang [15,21,23]

karena membantu mengurangi pencemaran abu terbang, murah dengan sifat mekanik yang dihasilkan tinggi [69].

### 2.3. Bahan Baku Geopolimer

Pemanfaatan limbah sebagai material prekursor dalam suatu teknologi telah banyak dilakukan oleh peneliti saat ini. Hal ini tidak saja menguntungkan secara ekonomi dalam proses pembuatannya tetapi juga membawa dampak terhadap lingkungan. Sebagai teknologi hijau yang diaplikasikan untuk material konstruksi khususnya beton maka dalam penelitian ini juga menggunakan prekursor yang berasal dari limbah buangan industri yakni abu terbang dan *silica fume*. Geopolimer berbahan abu terbang telah banyak digunakan dalam pengembangan geopolimer saat ini. Keuntungan dari pemakaian ini akan menghasilkan tingkat ekonomian dalam teknologi geopolimer dan mengurangi pencemaran lingkungan yang diakibatkan oleh abu terbang.

#### 2.3.1. Abu terbang

Abu terbang merupakan produk samping dari pembakaran batubara yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan industri, dengan ukuran partikel antara 0,5 sampai 100  $\mu\text{m}$ , dengan bentuk partikel *solid spheres*, *plerospheres*, *clathrospheres*, and *cenospheres (hollow spheres)* [31]. Saat ini jumlah limbah abu terbang terus mengalami peningkatan karena pemakaian batubara sebagai sumber energi untuk bahan bakar memiliki harga yang lebih murah dibandingkan dengan minyak bumi dan gas yakni berkisar \$1 - \$2 *permilion btu* untuk harga batubara dan \$4 - \$12 *permilion btu* untuk harga minyak dan gas [70]. Panias *et. al* melaporkan bahwa jumlah abu terbang yang dihasilkan pada tahun 2010 diperkirakan mencapai 800 juta ton [71]. Namun demikian, semakin besar limbah abu terbang, hanya sekitar 20-30% yang digunakan sebagai *filler* (pengisi) pada pembuatan beton dan sisanya ditimbun ke dalam tanah yang dapat merusak ekosistem disekitarnya [21].

Abu terbang memiliki komposisi yang heterogen dengan unsur utama  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  dan sebagian kecil unsur penyusun lain. Berdasarkan ASTM C618 abu terbang dapat dibagi kedalam 2 jenis yaitu abu terbang jenis F dan abu terbang jenis

C, kedua jenis tersebut yang membedakan adalah besarnya kandungan CaO. Abu terbang jenis F adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran batubara *anthracite* atau *bituminous* dengan kandungan CaO yang rendah yaitu dibawah 10%, biasanya abu terbang jenis ini memiliki mineral dengan fasa kristalin berupa *mullite*, *quartz*, *hematite*, dan *magnetite* sedangkan abu terbang jenis C dihasilkan dari proses pembakaran batubara *lignite* atau *sub-bituminous* dengan kandungan CaO diatas 10%. Pada abu terbang jenis C memiliki fasa kristalin dengan mineral berupa *quartz*, *lime*, *mullite*, *gehlenite*, *anhydrite* [36]. Perbedaan kedua jenis abu terbang ini dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Komposisi abu terbang jenis F dan C[36]

Parameter	Class F fly ash	Class C fly ash
Silicon dioxide (%)	45–64.4	23.1–50.5
Calcium oxide (%)	0.7–7.5	11.6–29.0
Aluminum oxide (%)	19.6–30.1	13.3–21.3
Iron oxide (%)	3.8–23.9	3.7–22.5
Sodium oxide (%)	0.3–2.8	0.5–7.3
Magnesium oxide (%)	0.7–1.7	1.5–7.5
Potassium oxide (%)	0.7–2.9	0.4–1.9
Loss on ignition (%)	0.4–7.2	0.3–1.9

### 2.3.2. Silica fume

*Silica fume* merupakan material limbah industri yang dihasilkan dari proses peleburan *silicon* dan *ferrosilicon* yang juga dikenal dengan nama *microsilica* [37]. *Silica fume* memiliki ukuran partikel yang sangat halus dengan ukuran partikel rata-rata  $\approx 100$  nm [72,73], ukuran tersebut 100 kali lebih kecil jika dibandingkan dengan ukuran partikel dari semen [73]. Kandungan utama *silica fume* adalah  $\text{SiO}_2$  dalam bentuk *amorphous* sebesar 95% [37] dan sebagian unsur lain dalam jumlah kecil seperti Fe, Al, Ca, Mg, K, Na dan S.

*Silica fume* memiliki warna putih dan abu-abu dan memiliki 3 jenis bentuk produk yakni *undesified silica fume (as produced)*, *shurry* dan *densified silica fume*. Namun yang paling banyak digunakan adalah *undesified silica fume* dan *densified silica*

*fume*, kedua jenis ini yang membedakan adalah *bulk density* (kepadatan) dimana *densified silica fume* merupakan modifikasi dari *undensified* dengan meningkatkan kepadatan sehingga *densified silica fume* memiliki kepadatan yang lebih tinggi dibandingkan *undensified silica fume*.

Penambahan *silica fume* dalam pembuatan beton pada semen memiliki 3 fungsi: 1) menghaluskan ukuran pori dan meningkatkan kepadatan pada matriknya; 2) bereaksi dengan *lime* (CaO) bebas; 3) menghaluskan ikatan antarmuka pasta semen dan agregat sehingga dari penambahan *silica fume* ini tentunya akan meningkatkan kekuatan pada beton [37]. Namun pemakaian *silica fume* dalam geopolimer telah dilaporkan Thokchom *et. al* dimana penambahan *silica fume* menurunkan kekuatan pada pasta geopolimer [27].

#### **2.4. Larutan Alkali**

Larutan alkali dalam sintesis geopolimer mempunyai peran yang sangat penting dalam proses geopolimerisasi. Larutan alkali yang digunakan terdiri dari campuran larutan NaOH dan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Weng *et. al* mengatakan bahwa proses sintesis geopolimer menggunakan dua jenis aktivator yaitu larutan alkali hidroksida (NaOH) dan larutan alkali silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) akan menghasilkan struktur geopolimer berupa *poly(sialate-siloxo)* dan *poly(sialate-disiloxo)* [68].

##### **2.4.1. Natrium hidroksida (NaOH)**

Logam alkali yang digunakan pada sintesis geopolimer adalah natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH). NaOH memiliki massa molekul relatif 40 gram/mol dengan bentuk *pellet* atau *flake* dapat mencapai kemurnian 97 - 98% dan mengalami reaksi *eksotermis* (panas) ketika dilarutkan dalam air atau asam. Namun pemakaian natrium hidroksida dalam proses sintesis geopolimer lebih banyak disukai karena menghasilkan ion  $\text{Si}^{4+}$  dan  $\text{Al}^{3+}$  lebih tinggi dibandingkan dengan kalium hidroksida [28] sedangkan Panagiotopouou *et. al* melaporkan bahwa penggunaan NaOH dalam proses sintesis geopolimer akan menghasilkan ion  $\text{Si}^{4+}$  dan  $\text{Al}^{3+}$  yang tinggi dibandingkan dengan KOH pada material prekursor yang lebih reaktif [74].

Konsentrasi larutan NaOH merupakan faktor yang sangat berpengaruh dalam sintesis geopolimer. Semakin tingginya konsentrasi larutan NaOH pada proses sintesis geopolimer akan menghasilkan tingkat kekuatan tekan yang semakin tinggi pula. Hal ini disebabkan oleh tingkat geopolimerisasi berupa disolusi terhadap permukaan partikel abu terbang yang terbentuk dari ikatan kovalen Si-O-Si dan Al-O-Al [41] semakin tinggi, sehingga menghasilkan monomer silika dan alumina dalam jumlah tinggi yang dibutuhkan dalam pembentukan struktur geopolimer.

Pengaruh konsentrasi larutan NaOH dalam geopolimer ini telah banyak dilaporkan oleh para peneliti. Goni *et. al* melaporkan bahwa semakin tinggi konsentrasi larutan NaOH untuk mendisolusi permukaan abu terbang maka semakin tinggi pula jumlah kelarutan Si dan Al yang dihasilkan [75], sedangkan Somna *et al* menggunakan konsentrasi larutan NaOH antara 9,5 M sampai 16,5 M dimana konsentrasi larutan NaOH pada 9.5M-14.0M memberikan kekuatan tekan pada geopolimer antara 20-23 MPa dengan proses pengerasan di temperatur kamar. Namun semakin tinggi konsentrasi larutan NaOH, akan menurunkan kekuatan tekan pada geopolimer [29].

#### 2.4.2. Natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

Natrium silikat digunakan pada proses sintesis untuk mempercepat terjadinya reaksi geopolimerisasi dan sekaligus meningkatkan sifat mekanik pada geopolimer. Natrium silikat ketika bereaksi dengan air membentuk *orthosilicic acid* ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) dan natrium hidroksida (NaOH). Sehingga dapat diketahui bahwa penambahan natrium silikat akan memberikan suplai *soluble silica* dan ion  $\text{OH}^-$ , yang berguna dalam proses geopolimerisasi. Xu dan Deventer [23] melaporkan bahwa penggunaan *waterglass* ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) meningkatkan disolusi pada permukaan partikel abu terbang.

#### 2.5. Metoda Sintesis Geopolimer

Dalam berbagai publikasi tentang geopolimer sangat sulit ditemukan penjelasan metoda sintesis yang digunakan, diperkirakan metoda sintesis yang digunakan pada umumnya adalah metoda secara langsung (N). Chindaprasirt *et. al* mengangkat masalah ini sebagai salah satu parameter dalam penelitiannya dengan



membandingkan tingkat kekuatan tekan yang dihasilkan antara metoda sintesis secara terpisah (S) dengan metoda sintesis secara langsung (N) [29].

Proses metoda sintesis secara langsung digunakan dengan cara mencampurkan seluruh prekursor larutan alkali yaitu NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (*waterglass*) dan air (*distilled water; aquades*) dalam satu wadah kemudian didiamkan selama 24 jam untuk menghilangkan reaksi *eksotermis* (panas). Setelah satu hari, larutan alkali yang terbentuk dicampurkan dengan abu terbang kemudian diaduk sampai homogen, pasta geopolimer yang terbentuk dituang dalam cetakan.

Sedangkan pada metoda sintesis terpisah proses pencampuran dalam larutan alkali dengan mencampurkan NaOH kedalam air terlebih dahulu, larutan NaOH yang terbentuk ini didinginkan selama 24 jam untuk menghilangkan reaksi eksotermis. Setelah satu hari, larutan NaOH dicampurkan kedalam abu terbang diaduk hingga rata, campuran homogen yang didapat lalu ditambahkan dengan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan diaduk lagi. Pasta geopolimer yang terbentuk dituangkan dalam cetakan.

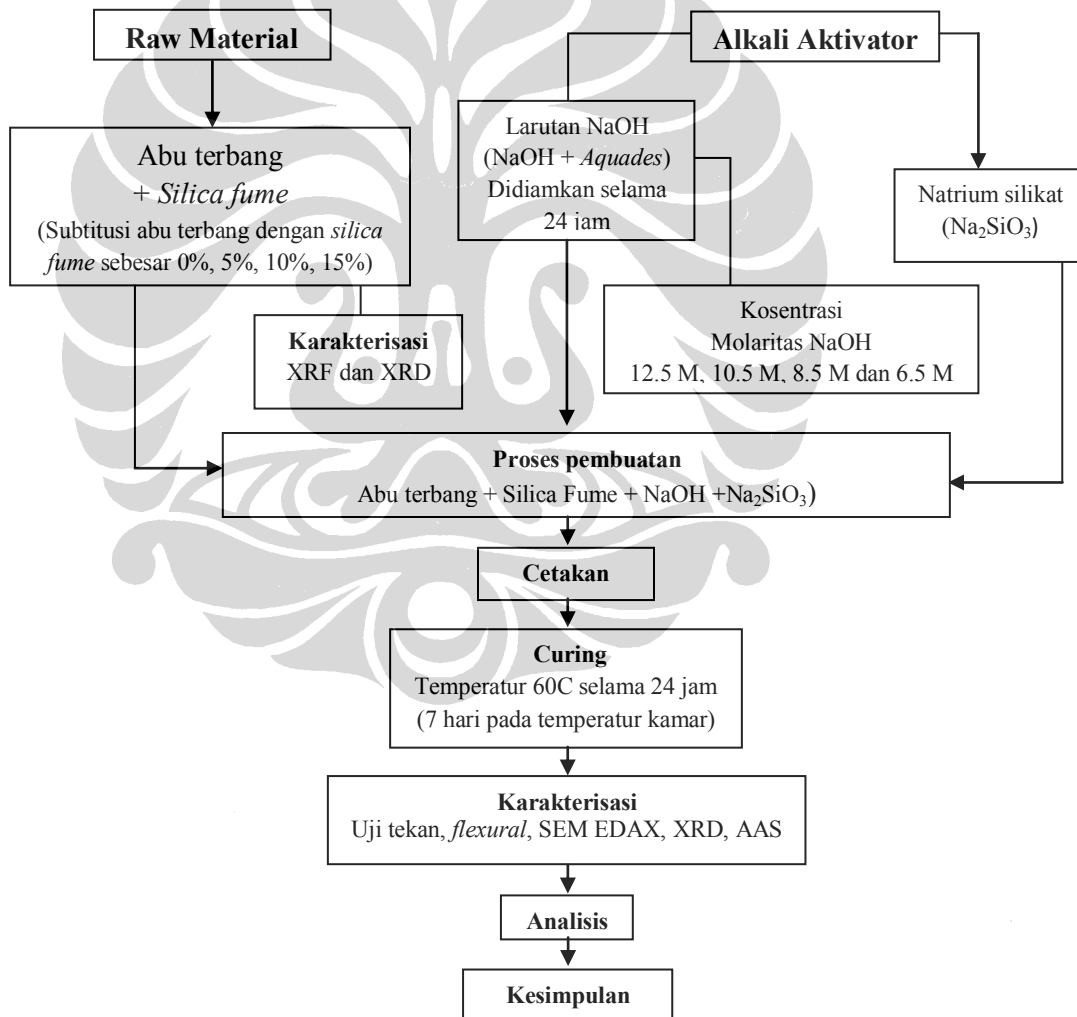
Dari kedua hasil metoda sintesis geopolimer tersebut dihasilkan kekuatan tekan yang tertinggi berasal dari metoda sintesis secara terpisah. Hal ini disebabkan karena disolusi permukaan partikel abu terbang yang diawali dengan larutan NaOH pada metoda sintesis terpisah menghasilkan Si dan Al terlarut yang tinggi [28].



## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini mengenai pengaruh konsentrasi NaOH dan penambahan *silica fume* terhadap karbonasi dan kekuatan pasta geopolimer. Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari prekursor berupa abu terbang dan *silica fume* sedangkan alkali aktivatornya yaitu NaOH *pellet* (Merck), Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Merck) dan air (*distilled water*). Bahan – bahan tersebut yang digunakan selama proses sintesis dari pasta geopolimer.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

### 3.2. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dibagi dalam 2 bagian yaitu peralatan untuk proses sintesis geopolimer dan peralatan untuk pengujian karakterisasi geopolimer. Untuk peralatan dalam proses sintesis geopolimer antara lain cetakan kubus untuk uji tekan dengan ukuran  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  dan cetakan untuk uji *flexural*  $1 \times 1 \times 8 \text{ cm}^3$ , wadah plastik, *mixer*, timbangan digital, sendok pengaduk dan pembukus plastik. Sedangkan peralatan yang digunakan untuk karakterisasi yaitu mesin uji tekan *Crushing test* dan mesin uji *flexural LF Plus Chatillon*, mesin uji *X-ray diffraction* (XRD), mesin uji *Scanning electron microscopy* (SEM), mesin uji *X-ray fluorescence* (XRF) dan mesin uji *Atomic absorption spectroscopy* (AAS).

Untuk bahan yang digunakan antara lain abu terbang yang berasal dari PLTU Suralaya, *silica fume* dari jenis *undesified*, Natrium hidroksida dari merk (NaOH 99%), Natrium silikat dari merk ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dengan kandungan 8.5  $\text{Na}_2\text{O}$ , 28.5  $\text{SiO}_2$ , 63  $\text{H}_2\text{O}$  dan air (*distilled water*).

### 3.3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan diawali dengan persiapan abu terbang, karakterisasi awal prekursor, metoda sintesis geopolimer dan karakterisasi sampel pasta geopolimer.

#### 3.3.1. Persiapan abu terbang

Dalam penelitian ini, prekursor abu terbang sebelum digunakan dilakukan proses *screening* (pengayakan). Tujuan proses pengayakan ini untuk memisahkan abu terbang yang telah berubah menjadi gumpalan padat akibat kelembapan pada masa penyimpanan. Disamping itu, pengayakan ini untuk mendekati pada kondisi keefisienan dari pemakaian abu terbang supaya mudah untuk digunakan. Oleh karena itu, saringan yang digunakan untuk proses pengayakan dengan no. 20 ( $850 \mu\text{m}$ ) berdasarkan ASTM E-11.

### 3.3.2. Karakterisasi prekursor geopolimer

Karakterisasi prekursor abu terbang dan *silica fume* dilakukan dengan mesin uji *X-ray fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia dari abu terbang dan *silica fume*. Karakterisasi dengan XRF dilakukan di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA) Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Sedangkan karakterisasi dari sifat *amorf* abu terbang dan *silica fume* dengan menggunakan mesin uji *X-ray diffraction* (XRD). Dalam pengujian ini menggunakan radiasi monokromatik  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1.54056\text{\AA}$ ) dengan benda uji berupa serbuk. Karakterisasi dari XRD dilakukan di Universitas Islam Negeri Hidayatullah Jakarta.

Penelusuran data jenis mineral yang dihasilkan berupa intensitas dan sudut difraksi ( $2\theta$ ) dilakukan dengan menggunakan bantuan peranti lunak Match! (*Crystal Impact software, versi 1.11d*), berdasarkan kemiripan dengan *basis data crystallography open database* (COD) tertanggal Maret 2012.

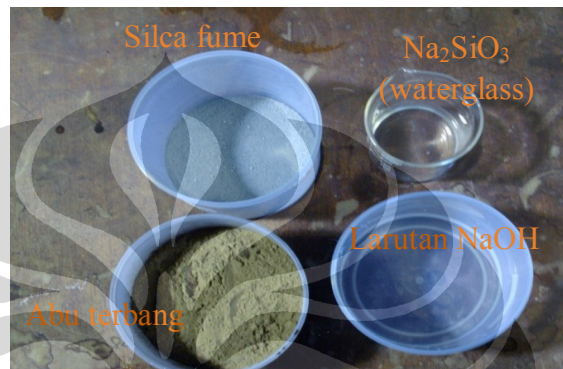
### 3.3.3 Leaching pasta geopolimer dengan aquades

Proses *leaching* merupakan proses preparasi sampel untuk pengujian AAS. Sampel pasta geopolimer yang telah dihaluskan dicampurkan kedalam *aquades* dalam *beaker* gelas dengan rasio berat abu terbang/*aquades* adalah 10mg/100ml, lalu campuran *distirrer* selama 1 jam. Filtrat dan *residu* dipisahkan dengan menggunakan kertas saring whatman 40. Filtrat yang mengandung  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Ca}^{2+}$  terlarut disimpan dalam botol plastik. Kosentrasi  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Ca}^{2+}$  yang terlarut dalam filtrat dianalisis dengan spektrofotometer serapan atom (AAS) yang terdapat di Departemen Kimia FMIPA Universitas Indonesia, sedangkan *residu* dianalisis dengan *X-ray diffractometer* (XRD). Hasil analisis dari AAS yang diperoleh dalam satuan ppm.

### 3.3.4. Metoda sintesis geopolimer

Metoda sintesis yang digunakan adalah metoda terpisah (S). Dalam metoda ini larutan NaOH yang telah terbentuk didiamkan selama 24 jam untuk menghilangkan reaksi *eksotermis*. Larutan ini kemudian dicampurkan dengan abu terbang dan diaduk hingga larut berbentuk lumpur padat. Penambahan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ke dalam lumpur padat

dilakukan untuk menguraikan menjadi bentuk cairan dan mempercepat terjadinya proses geopolimerisasi. Hal yang menarik dari metoda ini adalah dapat mengatur viskositas dalam proses sintesis geopolimer sedangkan keuntungan lain adalah dapat digunakan untuk proses sintesis dengan menggunakan dua prekursor seperti abu terbang dan *silica fume* seperti dalam penelitian ini. Tabel 3.1 merupakan komposisi campuran dalam proses sintesis pasta geopolimer.



**Gambar 3.2** Bahan Baku dalam proses sintesis geopolimer

**Tabel 3.1** Komposisi sintesis pasta geopolimer dalam molar

Campuran (mix)	Silica fume (%)	Kosentrasi Larutan NaOH (M)	Na/Al	Si/Al	H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O
1	0	6,5	0,2866	1,5800	21,2776	1,0047
	5		0,3017	1,7352		
	10		0,3184	1,9080		
	15		0,3372	2,1010		
2	0	8,6	0,3506	1,5675	16,8210	0,7500
	5		0,3690	1,7221		
	10		0,3898	1,8941		
	15		0,4125	2,0863		
3	0	10,5	0,4122	1,5555	13,8380	0,5794
	5		0,4339	1,7095		
	10		0,4580	1,8807		
	15		0,4849	2,0721		
4	0	12,5	0,4738	1,5434	11,6307	0,4532
	5		0,4987	1,6967		
	10		0,5264	1,8674		
	15		0,5574	2,0579		

### 3.5. Karakterisasi Geopolimer

Teknik karakterisasi digunakan untuk mengetahui karakteristik dari material yang dihasilkan pada penelitian ini. Beberapa pengujian tersebut adalah Karakteristik sifat mekanik, *X-ray diffractometer (XRD)*, *X-ray fluorescence (XRF)*, *Fourier transform infrared (FTIR)*, dan *Scanning electron microscopy (SEM)*.

#### 3.5.1. Karakterisasi sifat mekanik

Analisis terhadap sifat mekanik pasta geopolimer dilakukan dengan menggunakan pengujian kuat tekan (*compressive strength*) dan pengujian kuat lentur (*flexural strength*). Analisis ini diperlukan untuk mengetahui tingkat kekuatan dari setiap campuran yang telah dibuat menjadi pasta geopolimer.

##### 3.5.1.1. Kuat tekan

Kuat tekan adalah besarnya beban yang dapat ditahan oleh sampel geopolimer per satu satuan luas. Beban maksimum (kg) yang didapatkan dalam pengujian ini di kalkulasikan dengan luas permukaan sampel ( $\text{cm}^2$ ) sehingga didapatkan kuat tekan ( $\text{Kg/cm}^2$ ).

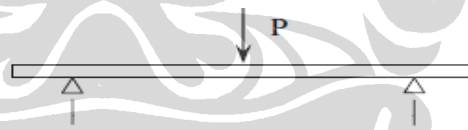
Pengukuran kuat tekan pasta geopolimer berbahan abu terbang dilakukan dengan menggunakan mesin uji tekan *crushing test*. Pengukuran kuat tekan dilakukan di laboratorium struktur dan material Departemen teknik sipil FTUI, Depok. Sampel yang digunakan adalah berbentuk kubus dengan ukuran  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  sesuai dengan standar ASTM C39. Pemastian ulang ukuran sampel dilakukan dengan jangka sorong. Setiap uji kuat tekan menggunakan 3 benda uji agar didapatkan kuat tekan rata – rata. Pengukuran kuat tekan dilakukan setelah 7 hari pengeringan di udara pada temperatur kamar pada masing – masing sampel pasta geopolimer berbahan abu terbang.



**Gambar 3.3** Mesin uji tekan

### 3.5.1.2. Kekuatan lentur (*Flexural Strength*)

Pengukuran kuat lentur pasta geopolimer berdasarkan dengan standar ASTM D790 dengan ukuran spesimen  $1 \times 1 \times 80 \text{ mm}^3$ , span 40 mm, kecepatan 4 mm/menit dengan jumlah sampel sebanyak 3 sampel. Data yang diperoleh dari pengujian kekuatan lentur diolah untuk mendapatkan normal *bending stress* yang dialami sampel dengan menggunakan rumus.



**Gambar 3.4** Gambar skema dari *three point bending*

$$\sigma = 3PL/2bh^2 \quad (3.1)$$

Dimana: P = Besar tekanan/pembebanan yang diberikan (N)

L = Panjang span (mm) (jarak antara tumpuan)

B = lebar (mm)

h = ketebalan dari benda uji (mm)



Gambar 3.5 Gambar mesin uji kekuatan lentur

### 3.5.2. X-ray diffraction (XRD)

Analisis XRD pada pasta geopolimer ditujukan untuk mengetahui struktur kristal dan derajat kristalisasi abu terbang, *silica fume* dan senyawa dari pasta geopolimer yang telah terbentuk. Analisis menggunakan mesin uji XRD SHIMADZU 7000(Cu-K $\alpha$ ,  $\lambda=0.154$  nm) pada 40kV dan 30 mA dengan kecepatan scan  $0.02^{\circ}\text{C min}^{-1}$  dan sudut *angle scan* 5-50 $^{\circ}$ .

Sebelum dilakukan pengujian, sampel terlebih dahulu dihaluskan hingga serupa dengan serbuk supaya diperoleh hasil yang baik. Sampel yang telah menjadi serbuk kemudian ditempatkan ke dalam pemegang sampel (*sample holder*) terbuat dari aluminium dengan ukuran 5 cm x 1.7cm berdiameter 1.4 cm, diratakan menggunakan kaca preparat sehingga diperoleh permukaan yang rata dan halus. Setelah itu, *sample holder* tersebut diletakkan pada kamar uji yang ada pada alat kemudian pengujian dilakukan sesuai dengan parameter operasi.

### 3.5.3. X- ray fluorescence (XRF)

Untuk uji komposisi dari abu terbang dan *silica fume* menggunakan XRF. XRF (*X – ray fluorescence*) digunakan secara luas untuk menentukan komposisi unsur dari suatu material, secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis XRF hanya efektif untuk unsur dengan berat molekul tinggi tetapi kurang akurat untuk unsur yang lebih ringan dari kalsium. Kelemahan ini disebabkan jumlah elektron yang terlalu sedikit



menyebabkan pancaran energinya lebih rendah dan sulit dideteksi. Kelemahan analisis XRF yang lain adalah tidak bisa mendeteksi unsur yang jumlahnya sangat sedikit. Untuk analisis unsur yang berat molekul yang ringan dengan jumlah sedikit biasanya menggunakan analisis lain, misalnya AAS.

#### **3.5.4. Scanning electron microscopy (SEM)**

Sampel pecahan pasta geopolimer dianalisis morfologinya lebih mendetail dengan menggunakan SEM. Sampel yang akan dianalisis adalah sampel yang mempunyai nilai kekuatan tekan yang tinggi. Sebelum dilakukan pengujian SEM, sampel pecahan di lapisi dengan emas. Prinsip kerja SEM yakni dengan memindai permukaan dari material. Sebuah gambar dihasilkan oleh SEM dengan memfokuskan berkas elektron yang memindai permukaan sebuah spesimen; tidak dihasilkan oleh iluminasi sekejap dari semua area seperti yang terjadi pada TEM. Perbedaan SEM dengan mikroskop optik terletak pada resolusi yang lebih tinggi dan kedalaman area yang lebih besar (*depth of field*). Topografi dan morfologi dapat diamati menggunakan instrument ini karena kedalaman area yang bisa mencapai orde puluhan *micrometer* pada perbesaran 1000X dan *orde micrometer* pada perbesaran 10000X.

Hal tersebut karena di dalam SEM dipergunakan *magnetic lense* sehingga lebih mudah mengontrol perbesaran yang diinginkan berbeda dengan mikroskop optik yang menggunakan lensa yang perbesarannya terbatas. Dengan SEM juga dapat diperoleh informasi kimia dari spesimen dengan menggunakan EDAX.

#### **3.5.5. AAS (Atomic Absorbption Spectroscopy)**

AAS merupakan suatu teknik analisis untuk menetapkan konsentrasi suatu unsur (logam) dan semi logam yang terlarut. Pengujian dengan AAS pada sampel geopolimer untuk melihat unsur yang terlarut dalam hal ini adalah  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Ca}^{2+}$  pada pasta geopolimer yang telah dibuat. Namun sebelum dilakukan pengujian AAS dilakukan persiapan sampel dengan melakukan *leaching* terhadap pasta geopolimer yang telah dihaluskan.

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas hasil sintesis pasta geopolimer melalui metoda terpisah. Pada metoda terpisah proses pencampuran larutan alkali dengan melarutkan NaOH kedalam air terlebih dahulu, larutan NaOH yang terbentuk didinginkan untuk menghilangkan reaksi eksotermis. Setelah dingin, larutan NaOH dicampurkan kedalam abu terbang dan diaduk hingga rata, campuran homogen yang didapat kemudian ditambahkan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Pasta geopolimer yang terbentuk dituangkan dalam cetakan. Proses *curing* dilakukan pada temperatur  $60^\circ\text{C}$  selama 24 jam, dilanjutkan dengan proses *curing* pada temperatur kamar selama 7 hari, kemudian dilakukan dengan pengujian pada 48 sampel yang telah dibuat, terdiri dari 4 jenis *mix design* dengan 3 variasi penambahan dari *silica fume* yakni 5%, 10% dan 15%. Hasil dari karakterisasi yang diharapkan akan menjelaskan pengaruh variabel tersebut terhadap sifat mekanik yang dihasilkan serta kontribusinya *silica fume* dan konsentrasi molaritas NaOH terhadap terbentuknya karbonasi dan kekuatan pasta geopolimer.

### 4.1. Analisis Karakterisasi Prekursor Awal Pasta Geopolimer

Analisis terhadap karakterisasi prekursor awal dilakukan pada abu terbang dan *silica fume*. Karakterisasi prekursor awal ini sangat diperlukan dalam memudahkan penyusunan *mix design* untuk proses sintesis geopolimer. Untuk karakterisasi awal dalam penelitian ini menggunakan fluoresensi sinar-X (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia abu terbang sedangkan untuk melihat analisis fasa atau kandungan mineral kualitatif terhadap abu terbang dengan menggunakan XRD.

#### 4.1.1. Abu terbang

Abu terbang adalah material yang heterogen dengan sifat fisik, kimia dan mineral yang bervariasi dimana sifat-sifat tersebut tergantung pada sumber batubara dan teknologi pembakarannya [31]. Dalam penelitian ini abu terbang yang digunakan berasal dari PLTU Suralaya Banten. Seperti yang diketahui bahwa komposisi kimia abu terbang yang dihasilkan tidak selalu sama walaupun berasal dari proses produksi

yang sama. Oleh karena itu, abu terbang dianalisis komposisi kimianya dengan flouresensi sinar-X (XRF). Hasil analisis XRF berupa senyawa oksida seperti  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan lain-lain. Komposisi kimia dari abu terbang dapat dilihat pada tabel 4.1. Berdasarkan ASTM C 618 abu terbang terbagi menjadi dua jenis yaitu abu terbang jenis F dan abu terbang jenis C, kedua jenis ini yang membedakan adalah besarnya kandungan  $\text{CaO}$  pada abu terbang, dimana kandungan  $\text{CaO}$  untuk jenis C lebih dari 10% sedangkan untuk abu terbang jenis F dengan kandungan  $\text{CaO}$  kurang dari 10%.

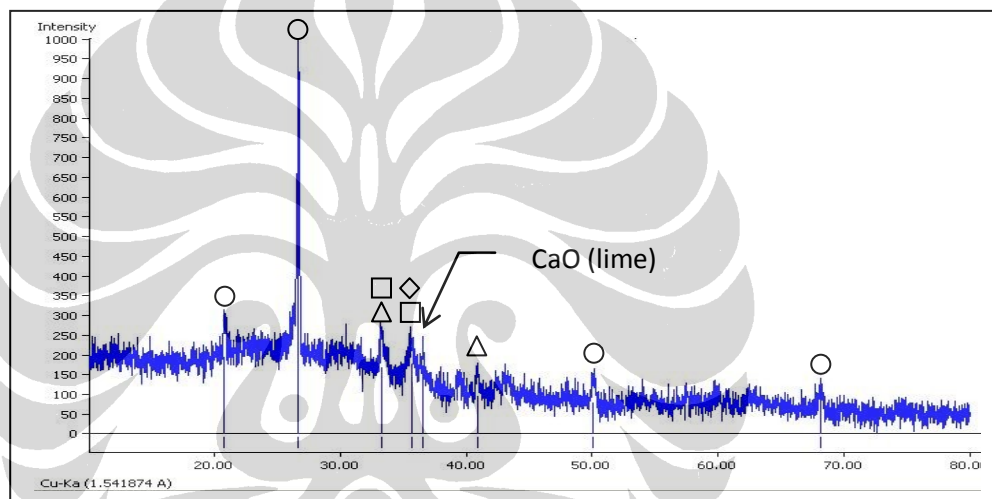
**Tabel 4.1.** Komposisi kimia abu terbang dan *silica fume* (%wt) pada pengujian XRF

Oksida	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$
<b>Abu terbang</b>	36.57	16.08	19.26	4.78	16.55	1.5	1.27	1.28	1.16
<b>Silica fume</b>	96.78	0.83	0.04	-	0.13	1.05	0.25	-	-

Pada komposisi kimia abu terbang yang terdapat pada tabel 4.1 memiliki kandungan senyawa oksida  $\text{CaO}$  sebesar 16,55% dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sebesar 19,26% merupakan kandungan senyawa oksida yang cukup besar pada abu terbang. Kehadiran  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan  $\text{CaO}$  yang cukup tinggi dapat membawa dampak positif dan negatif atau tidak ada pengaruh sama sekali. Fernandez-Jimenez dan Polomo mengklaim bahwa kehadiran besi dan kalsium tidak berpengaruh terhadap kekuatan pada geopolimer karena tidak ditemukan dalam reaksi utama geopolimer [32], sebaliknya kehadiran  $\text{CaO}$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mengganggu proses disolusi pada partikel permukaan abu terbang karena larutan alkali yang digunakan untuk disolusi partikel abu terbang bereaksi dengan  $\text{CaO}$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  membentuk  $\text{Ca(OH)}_2$  dan  $\text{Fe(OH)}_3$  akibatnya dari pembentukan ini menyebabkan menurun/hilangnya ion hydrosil ( $\text{OH}^-$ ) [33]. Namun disisi lain, kandungan  $\text{CaO}$  yang tinggi akan menghasilkan mikrostruktur dengan porositas rendah dan juga terbentuknya struktur amorphous Ca-Al-Si gel sebagai hasil produk akhir [34] sehingga meningkatkan sifat mekanik yang dihasilkan [35]. Sedangkan senyawa oksida yang diperlukan dalam sintesis geopolimer yakni  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  memiliki persentase sebesar 36,57% dan 16,08%.

Dari data komposisi kimia pengujian XRF dapat disimpulkan bahwa abu terbang dari PLTU Suralaya termasuk abu terbang jenis C berdasarkan kandungan CaO yang dimiliki yaitu diatas 10% [36]. Namun hal ini perlu dibuktikan lagi melalui uji XRD berdasarkan puncak (*peak*) fasa mineral kristalin yang muncul.

Seperti yang diketahui bahwa tidak semua Si dan Al yang terkandung dalam abu terbang dapat bereaksi dalam larutan NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Hanya Si dan Al dalam fasa *amorf* yang lebih mudah larut dalam kondisi basa [33]. Untuk melihat kondisi *amorf* dari abu terbang dapat menggunakan difraktogram hasil analisis XRD seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1.



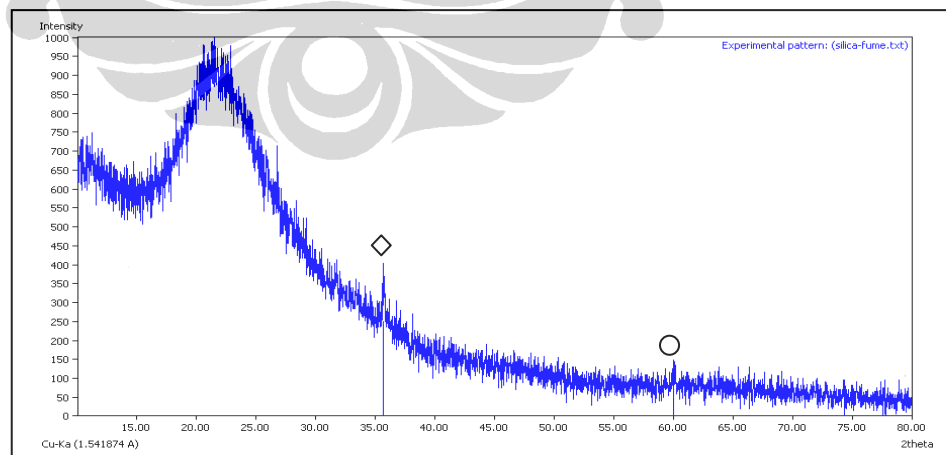
**Gambar 4.1.** Difraktogram Abu terbang: (△) *mullite* ( $Al_{2,34}O_{4,83}Si_{0,66}$ ), (◇) *Magnetite* ( $Fe_3O_4$ ), (○) *Quartz* ( $SiO_2$ ), (□) *hematite* ( $Fe_2O_3$ ) dan *lime* (CaO)

Pada gambar 4.1 merupakan hasil difraktogram dari abu terbang dimana fasa *amorf* pada abu terbang dapat dilihat dari bukit atau gundukan (*hump*) pada  $2\theta$  antara 15-38°. Disamping itu, juga terdapat puncak-puncak dengan intensitas tinggi yang menunjukkan adanya mineral fasa kristalin. Untuk mendeteksi mineral fasa kristalin pada puncak tersebut menggunakan bantuan peranti lunak Match! (*Crystal Impact software, versi 1.11d*) berdasarkan kemiripan dengan *basis data crystallography open database* (COD) tertanggal Maret 2012. Mineral fasa kristalin *aquartz* (○) dengan intensitas tertinggi ditunjukkan pada  $2\theta = 26,66^\circ$  dan puncak lain dengan intensitas yang kecil pada  $2\theta = 20,80^\circ$ ;  $2\theta = 50,07^\circ$ ;  $2\theta = 68,11^\circ$ . Untuk puncak yang menunjukkan mineral fasa kristalin *mullite* (△) terdapat pada  $2\theta = 33,31^\circ$ ;  $2\theta = 40,90^\circ$ ,

puncak mineral fasa kristalin *magnetite* ( $\diamond$ ) terdapat pada  $2\theta = 35,63^\circ$ , puncak mineral fasa kristalin *hematite* ( $\square$ ) terdapat pada  $2\theta = 33,27^\circ$ ;  $2\theta = 35,71^\circ$  dan puncak *lime free* (CaO) yang pada  $2\theta = 36,52^\circ$ . Hasil data difraktogram menunjukkan bahwa puncak-puncak mineral fasa kristalin pada abu terbang PLTU Suralaya lebih condong ke abu terbang jenis F (*mullite* dan *magnetite*) tetapi adanya puncak kristalin mineral *lime free* (CaO), juga mengarahkan ke abu terbang jenis C. Standar ASTM C618 menjelaskan bahwa mineral fasa kristalin abu terbang jenis F adalah *mullite*, *magnetite*, *quartz* sedangkan untuk abu terbang jenis C adalah *quartz*, *lime* dan *mullite* [36]. Namun demikian, berdasarkan besarnya kandungan CaO dapat disimpulkan bahwa abu terbang PLTU Suralaya adalah jenis C.

#### 4.1.2 Silica fume

*Silica fume* atau juga dikenal dengan *microsilica* adalah material limbah dengan kandungan silika yang sangat tinggi yang diperoleh dari hasil proses produksi *silicon* dan *ferrosilicon*. Ada dua jenis *silica fume* yang saat ini digunakan sebagai *additive* dalam material konstruksi khususnya beton yaitu *silica fume undensified* dan *silica fume densified*. *Silica fume* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *silica fume* dengan jenis *undensified* yang memiliki tingkat kepadatan yang rendah yaitu 130-430  $\text{kg/m}^3$  sedangkan jenis *silica fume densified* dengan tingkatan kepadatan 480-720  $\text{kg/m}^3$  [37].



**Gambar 4.2.** Difraktogram *silica fume*; ( $\diamond$ ) *Magnetite* ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ( $\circ$ ) *Quartz* ( $\text{SiO}_2$ ),

Hasil pengujian fluoresensi sinar-X (XRF) yang ditunjukkan pada tabel 4.2 terlihat bahwa *silica fume* mempunyai kandungan pengotor yang rendah seperti  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,83%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,04%) dan  $\text{CaO}$  (0,13%). Penggunaan *silica fume* sebagai bahan yang akan menggantikan sebagian kecil dari abu terbang pada proses sintesis geopolimer juga memerlukan analisis difraktogram XRD untuk mengetahui fasa *amorf* seperti yang dilakukan pada abu terbang. Hasil pengujian XRD pada gambar 4.1 menunjukkan bahwa *silica fume* memiliki fasa *amorf* yang ditunjukkan dengan bukit (*hump*) pada  $2\Theta = 15 - 40^\circ$ . Disamping itu, juga terdapat mineral dengan fasa kristalin *quartz* ( $\text{SiO}_2$ ) pada  $2\Theta = 59,98^\circ$  dan puncak mineral *magnetite* pada  $2\Theta = 35,74^\circ$ .

#### 4.2. Analisis Sifat Mekanik

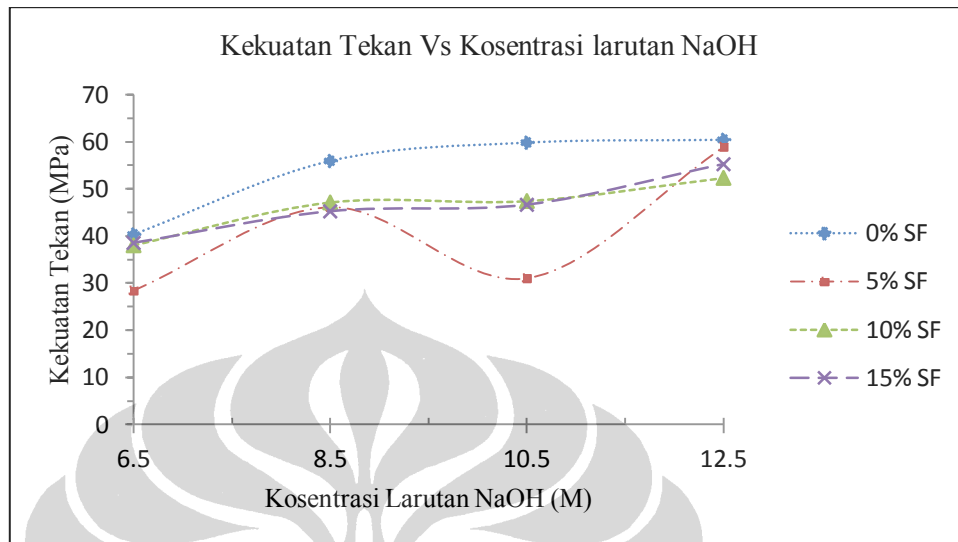
Analisis terhadap prekursor abu terbang menunjukkan bahwa abu terbang PLTU Suralaya yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam abu terbang jenis C. Abu terbang jenis C memiliki karakteristik yang berbeda dari abu terbang jenis F. Salah satu perbedaan tersebut adalah besarnya kandungan senyawa oksida yang dimiliki yaitu kandungan  $\text{CaO}$  diatas 10%.

Pada penelitian ini menggunakan 4 jenis *mix design*, keempat *mix design* tersebut yang membedakan adalah konsentrasi larutan  $\text{NaOH}$  dan penggunaan *silica fume* dalam setiap *mix design* dengan variasi penggantian dari abu terbang sebesar 0%, 5%, 10% dan 15%, bertujuan untuk memperoleh suplai Si yang dimiliki oleh *silica fume*. Karena semakin besar perbandingan Si/Al yang terbentuk akan menghasilkan tingkat kekuatan geopolimer yang tinggi [38]. Untuk melihat pengaruh konsentrasi larutan  $\text{NaOH}$  dan peran *silica fume* sebagai pengganti sebagian dari abu terbang dilakukan pengujian sifat mekanik berupa kekuatan tekan (*compressive strength*) dan kekuatan lentur (*flexural strength*) pasta geopolimer.

##### 4.2.1 Kekuatan tekan (*Compressive Strength*)

Analisis kekuatan pasta geopolimer dilihat dari dua parameter yaitu kekuatan tekan terhadap konsentrasi larutan  $\text{NaOH}$  dan kekuatan tekan terhadap % *silica fume*.

Untuk kekuatan tekan terhadap konsentrasi larutan NaOH seperti yang terlihat pada gambar 4.3.

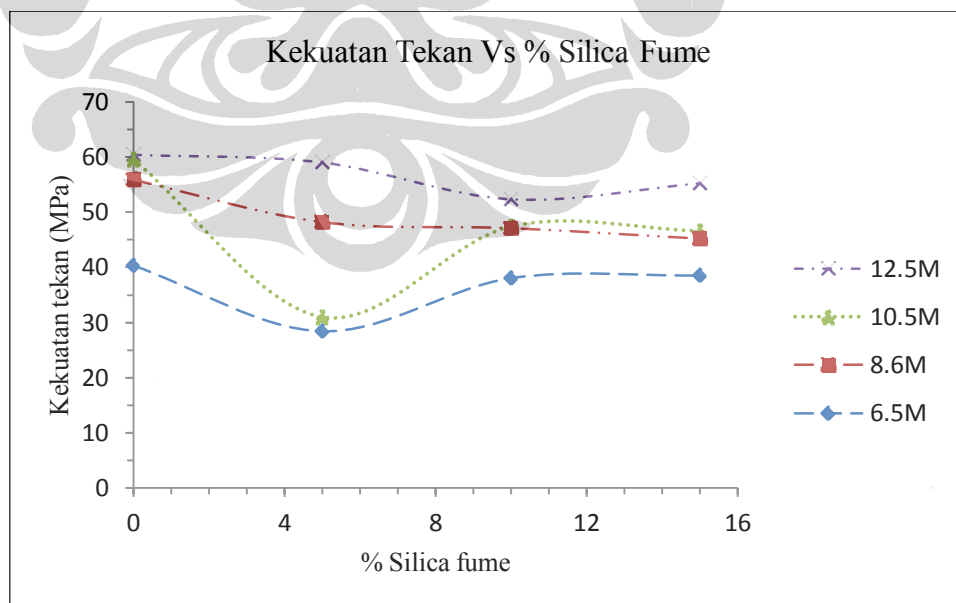


**Gambar 4.3.** Kekuatan tekan pasta geopolimer terhadap kosentrasi larutan NaOH

Pada gambar 4.3 merupakan gambaran kekuatan tekan yang dihasilkan oleh konsentrasi larutan NaOH dimulai dari konsentrasi 6,5 M, 8,6 M, 10,5M, dan 12,5M dengan variasi penggantian *silica fume* sebesar 0%, 5%, 10% dan 15%. Kekuatan tekan tertinggi dihasilkan pada pasta geopolimer dengan 0% *silica fume*. Kekuatan tekan mengalami peningkatan dengan semakin tingginya konsentrasi larutan NaOH dimana kekuatan tekan tertinggi pasta geopolimer terjadi pada konsentrasi larutan NaOH 12,5M. Sedangkan pada pasta geopolimer dengan variasi 5%Sf, 10%Sf dan 15%Sf juga mengalami hal yang sama yaitu kekuatan tekan meningkat dengan meningkatnya konsentrasi larutan NaOH, akan tetapi peningkatan kekuatan ini tidak sama dengan kekuatan tekan pasta geopolimer tanpa %Sf. Namun demikian, semakin tinggi konsentrasi larutan NaOH membuat peningkatan kekuatan tekan semakin kecil bahkan konstan pada pasta geopolimers dengan 0%Sf seperti terlihat pada konsentrasi larutan NaOH 12,5M dengan kekuatan tekan 60,4 MPa dibandingkan konsentrasi larutan NaOH 10,5M dengan kekuatan tekan 59,6 MPa. Hasil ini kemungkinan disebabkan oleh tingkat kelarutan dari CaO yang semakin tinggi sehingga proses pengerasan yang terjadi lebih cepat [39]. Disamping itu, pengaruh senyawa oksida

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  mulai terlihat terhadap adonan pasta geopolimer. Reaksi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  terhadap udara membentuk  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , membuat hasil pengadukan adonan pasta dengan kehadiran  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  menghasilkan gelembung udara yang semakin banyak. Semakin cepat pasta geopolimer mengeras membuat gelembung udara tidak mempunyai kesempatan untuk keluar sehingga terperangkap di dalam material akibatnya pasta geopolimer mengalami penurunan kekuatan tekan.

Penggunaan *silica fume* sebagai pengganti sebagian kecil abu terbang, diharapkan mampu menaikkan sifat mekanik geopolimer ternyata tidak sesuai dengan yang diinginkan, kekuatan pasta geopolimer mengalami penurunan kekuatan tekan, seperti terlihat pada gambar 4.4 yang menggambarkan grafik antara kekuatan tekan terhadap % *silica fume*. Pada gambar tersebut terlihat penurunan kekuatan tekan dengan pola berbeda-beda setiap variasi %Sf pada konsentrasi larutan NaOH 6,5M, 8,6M, 10,5M dan 12,5M. Pada konsentrasi larutan NaOH 6,5M dengan 5%Sf mengalami penurunan kekuatan tekan, namun pada 10%Sf dan 15%Sf kekuatan tekan kembali naik. Sedangkan konsentrasi larutan NaOH 8,6M pada 5%Sf mengalami penurunan kekuatan tekan dan 10%Sf kekuatan tekan kembali naik, kemudian turun lagi pada 15%Sf. Pola yang sama juga terjadi pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M dan 12,5M.



**Gambar 4.4.** Kekuatan tekan pasta geopolimer terhadap % *silica fume*

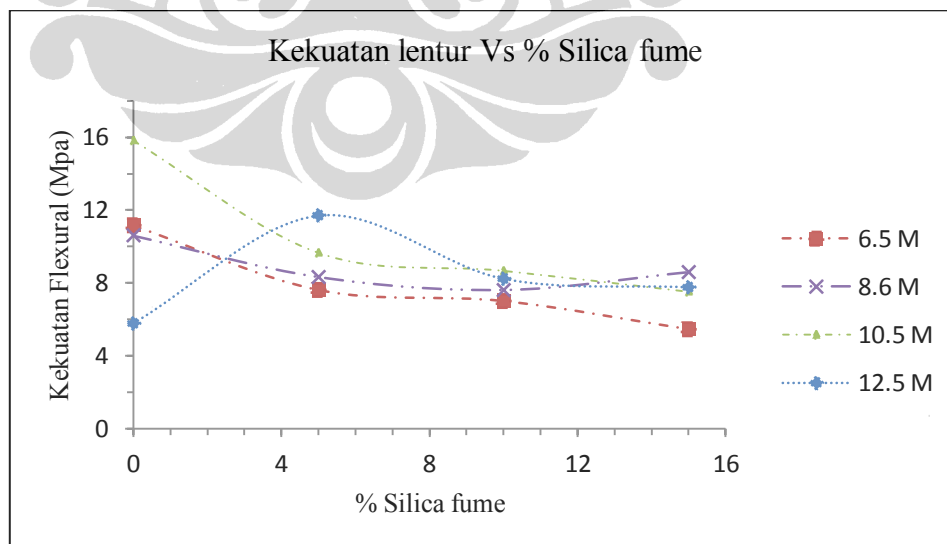


Namun demikian, semakin tingginya konsentrasi larutan NaOH membuat kekuatan tekan pasta geopolimer dengan %Sf mendekati kekuatan tekan pasta geopolimer tanpa %Sf seperti terlihat pada konsentrasi larutan NaOH 12,5M yaitu 60,4 MPa pada 0%Sf dan 58,9 MPa pada 5%Sf sedangkan 10%Sf dan 15%Sf hanya mengalami peningkatan kekuatan tekan yang kecil. Sebaliknya peningkatan kekuatan tekan pasta geopolimer dengan 5%Sf, tidak terjadi pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M dimana kekuatan tekan pasta geopolimer menurun secara drastis.

Hasil pengamatan sebelum pengujian terhadap pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 10,5M dengan 5%Sf menunjukkan terjadinya retak halus pada permukaan pasta geopolimer dan dari pengamatan terhadap pecahan sampel juga menunjukkan banyaknya rongga (*void*) yang terbentuk, terbentuknya rongga diindikasikan akibatkan terperangkapnya udara pada proses sintesis geopolimer. morfologi dari pasta geopolimer dapat dilihat pada subbab analisis SEM.

#### 4.2.2 Kekuatan lentur (*Flexural Strength*)

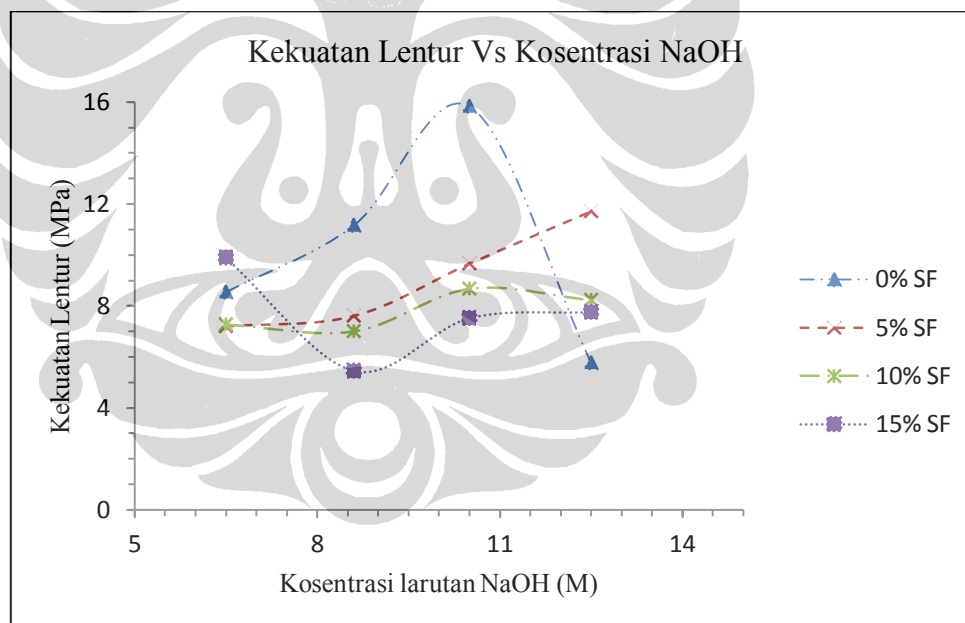
Kekuatan lentur pasta geopolimer dengan penggantian *silica fume* (%) terhadap konsentrasi larutan NaOH (M) mengalami penurunan. Peristiwa ini sama yang terjadi pada kekuatan tekan, namun pada kekuatan lentur pasta geopolimer, penurunan terus meningkat dengan semakin besar peningkatan *silica fume*.



Gambar 4.5. Kekuatan lentur pasta geopolimer terhadap % *silica fume*

Penyebab dari penurunan ini diperkirakan oleh pengaruh proses penguapan yang sangat cepat dengan adanya *silica fume* dalam pasta geopolimer, hal ini dibuktikan dengan berat pasta geopolimer menjadi ringan [40], ditambah lagi dengan dimensi sampel pasta geopolimer yang sangat kecil menyebabkan mengalami karapuhan akibat kehilangan air yang terlalu cepat dibandingkan dengan terbentuknya kekuatan, padahal air diperlukan dalam pembentukan kekuatan awal geopolimer seperti terlihat gambar 4.5.

Namun yang paling mencolok dari penurunan tersebut adalah yang terjadi pada sampel pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 12,5 M dengan 0% Sf. Hasil ini berbanding terbalik dengan hasil pada kekuatan tekan. Pengamatan terhadap sampel menunjukkan permukaan pasta geopolimer setelah dilakukan pemanasan menjadi kasar dan rapuh akibat karbonasi.



**Gambar 4.6.** Kekuatan lentur pasta geopolimer terhadap konsentrasi NaOH

### 4.3. Analisis Morfologi Sampel Patahan (SEM)

Pengujian morfologi terhadap pasta geopolimer dilakukan terhadap pecahan sampel yang telah mengalami pengujian tekan dengan menggunakan *Scanning Electron*

*Microscope* (SEM) dan EDAX. Sampel yang diambil untuk pengujian tekan berasal dari pasta geopolimer yang memiliki kekuatan tekan tinggi. Analisis pecahan pasta geopolimer dilakukan pada formula campuran tanpa menggunakan *silica fume* dan menggunakan *silica fume* dengan persentase *silica fume*. Untuk pecahan sampel dengan menggunakan *silica fume*, analisis terhadap morfologi dilakukan pada campuran dengan konsentrasi larutan NaOH 10,5M.

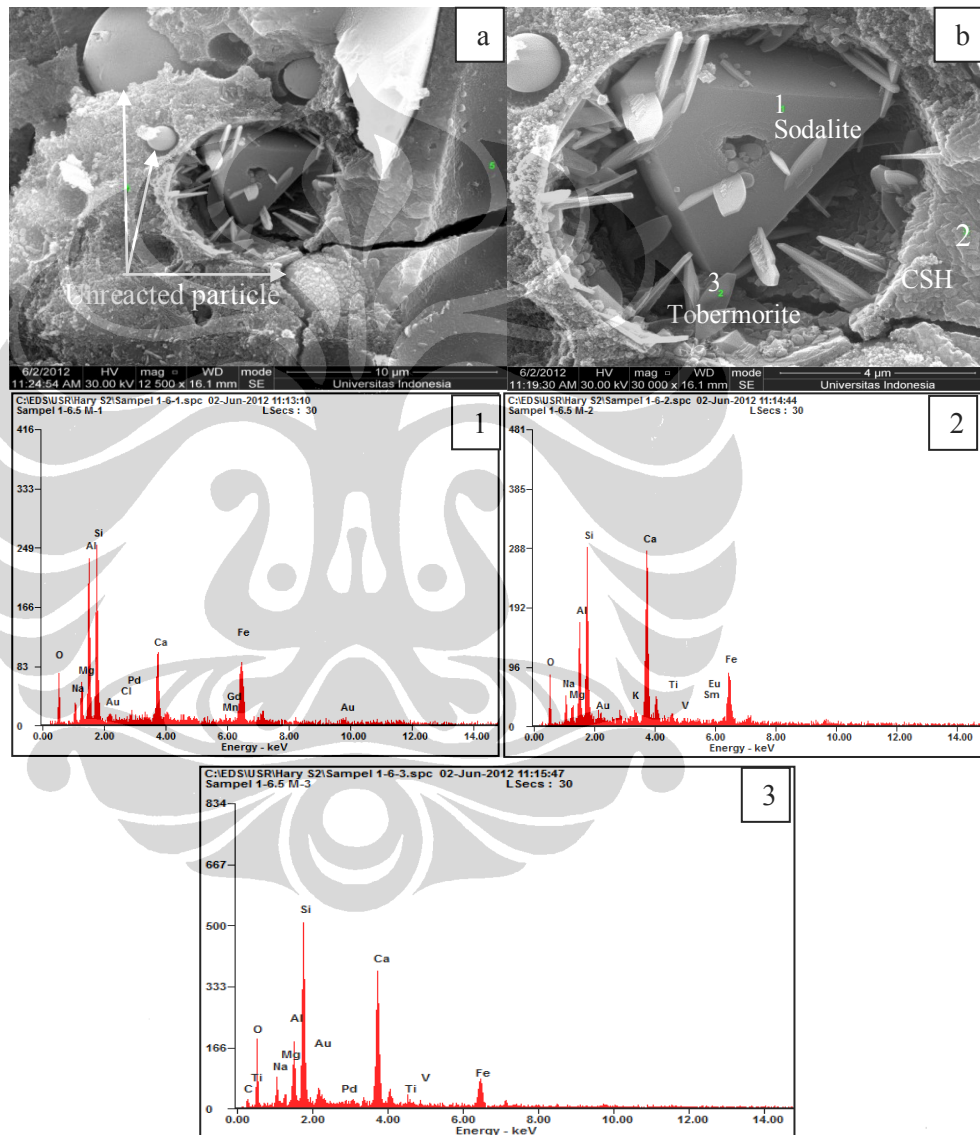
#### 4.3.1 . Morfologi Pasta Geopolimer Berdasarkan Konsentrasi Larutan NaOH

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi pasta geopolimer berdasarkan konsentrasi larutan NaOH. Konsentrasi larutan yang digunakan adalah 6,5M, 8,6M, 10,5M dan 12,5M tanpa menggunakan % *silica fume*. Sedangkan EDAX digunakan untuk mengetahui komposisi unsur penyusun pasta geopolimer.

##### 4.3.1.1 Morfologi pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 6,5M

Pada gambar 4.7 terlihat strukturmikro pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 6,5M dengan 0%Sf, pada gambar tersebut memperlihatkan beberapa partikel abu terbang yang masih utuh yang diselubungi oleh matrik. Namun dari gambar strukturmikro tersebut juga terdapat partikel dengan bentuk segitiga dalam rongga (lubang bekas partikel abu terbang). Partikel segitiga tersebut diindikasikan sebagai *zeolite* dari jenis Na-X, terbentuk dalam proses hidrasi sedangkan partikel dengan bentuk *flake* (serpihan) yang tumbuh di permukaan lubang diindikasikan sebagai *tobermorite* terbentuk dari C-S-H (*calcium silicate hydrate*) yang berada disekitar rongga/void [46]. Untuk memastikan komposisi penyusun partikel dilakukan EDAX pada beberapa titik. Pada gambar b area 1 menunjukkan komposisi yang terdapat pada partikel berbentuk segitiga. Unsur-unsur yang terdapat pada partikel tersebut adalah Si, Al, Ca dan Fe dengan besar kandungan unsur secara *atomic %* (at%) adalah Si= 23,11%, Al= 20,56%, Ca= 5.26% dan Fe= 7,07%, O= 30,98% dan Na= 4,20%. Berdasarkan komposisi unsur tersebut diindikasikan sebagai Na-X. Alvarez-Ayuso *et. al* melaporkan bahwa *zeolite X* (Na-X) terbentuk pada proses sintesis dengan konsentrasi larutan NaOH paling sedikit yaitu 5M [45], namun berdasarkan perbandingan rasio Si/Al= 1 termasuk ke dalam *sodalite* (*hydroxysodalite*) [49].

Sedangkan no. 2 komposisi unsur penyusunnya adalah C= 13,82%, O= 41,99%, Al= 6,79%, Si= 17,63% dan Ca= 8,54%. Pada konsentrasi larutan alkali yang rendah membuat  $\text{Ca}^{2+}$  terdisolusi membentuk  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sehingga mengakibatkan berkurangnya jumlah  $\text{OH}^-$  yang akan menurunkan disolusi terhadap Al dan Si pada permukaan partikel abu terbang [41].



**Gambar 4.7.** Strukturmikro SEM pasta geopolimer pada konsentrasi larutan 6,5M pada campuran 0% $\text{Sf}$ ; a) perbesaran 12.500x; a3) EDAX pada area 3 dan b) Perbesaran 30.000x; b1)EDAX pada area 1; b2) EDAX pada area 2.

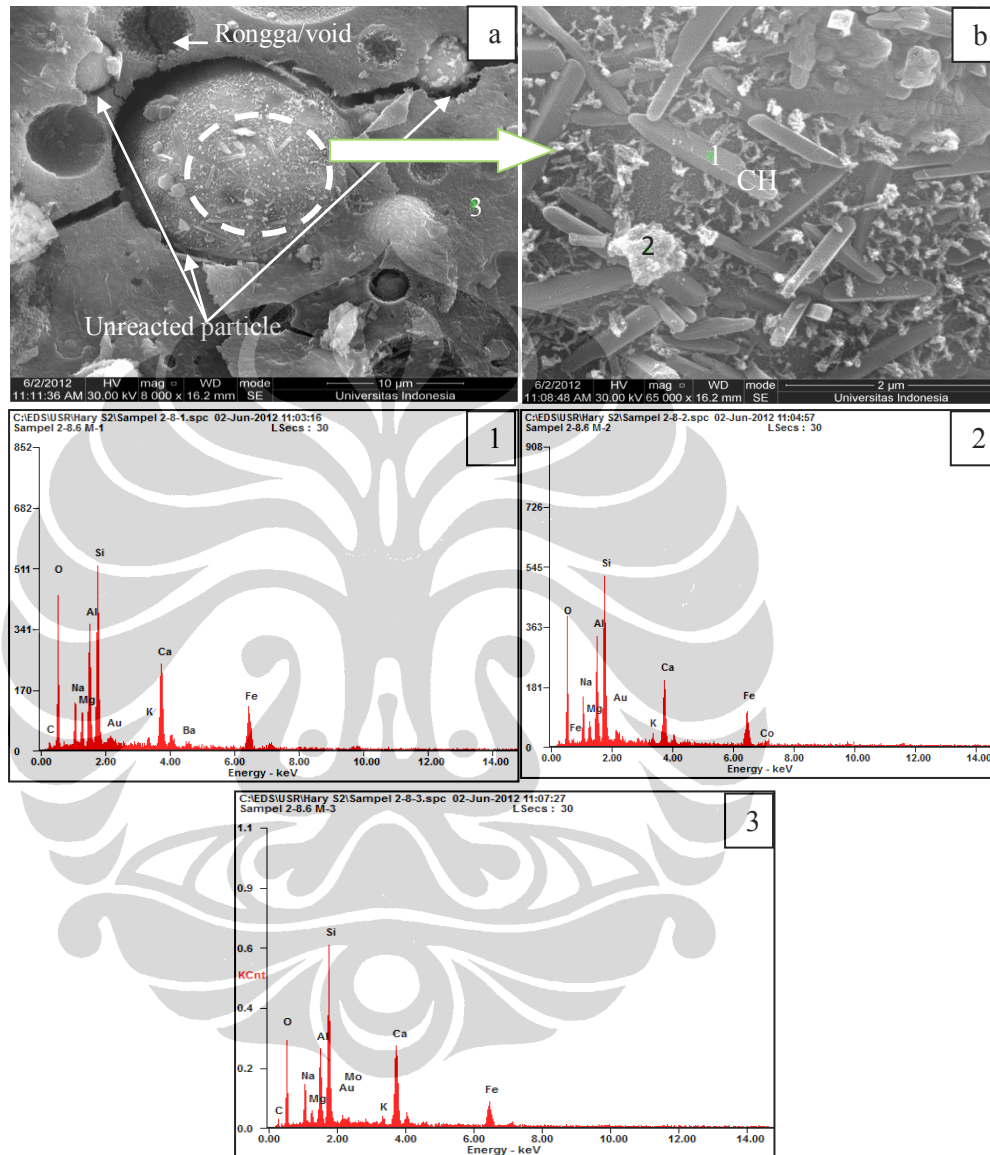
Pada konsentrasi larutan NaOH rendah, jumlah Si yang terlarut lebih tinggi dari Al [41] sehingga CSH mempunyai peluang untuk terbentuk. Akan tetapi, CSH gel yang terbentuk merupakan material fasa *amorphous* dan *metastable* yang akan mengalami perubahan ke material fasa kristalin dan *stable* dengan proses pemanasan, salah satu hasil perubahan tersebut adalah *tobermorite* [47]. Gambar b pada titik 3 diperkirakan *tobermorite* dari perubahan CSH gel. Komposisi permukaan *tobermorite* ditunjukkan pada gambar b pada titik 3 dengan komposisi unsur penyusunnya yaitu Si= 21,25%, Al= 12,74%, O= 35,19%, Na= 5,78% dan Ca= 12,83%. Namun hasil perbandingan rasio yang dihasilkan Ca/Si= 0,6 ini, tidak mencapai struktur stabil *tobermorite* yaitu Ca/Si= 0,8 [50-51]. Perkiraan lain dari partikel tersebut adalah karbonasi CaCO<sub>3</sub> dimana partikel yang terbentuk menyerupai lapisan prismatic (*layer prismatic*) [48].

#### 4.3.1.2. Morfologi pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 8,6M

Gambar 4.8 strukturmikro pasta geopolimer dengan konsentrasi larutan 8,6M dengan 0% Sf. Gambar a menunjukkan partikel abu terbang ukuran besar yang tidak mengalami proses disolusi, pada area itu juga terdapat retakan yang melalui/memotong area pada partikel abu terbang dan lubang bekas partikel abu terbang yang ditumbuhi oleh partikel dengan bentuk seperti batang. Gambar b menunjukkan area dipermukaan abu terbang yang diperbesar 65.000x, pada area ini terdapat kumpulan partikel berbentuk batang dan serpihan. Di tenggarai partikel dengan bentuk batang tersebut adalah *calcium hydroxide* (CH, *Portlandite*) [52]. Hasil EDAX pada salah satu partikel seperti yang ditunjukkan pada gambar 1 yang memperlihatkan *spectrum* dari unsur-unsur penyusun area 1. Dari hasil EDAX menunjukkan, komposisi unsur penyusun dari partikel batang tersebut terdiri dari C= 7,37%, O= 50,49%, Si= 14,33%, Al= 10,42%, Ca= 4,23% .

Sedangkan pada gambar b menunjukkan unsur penyusun area 2, pada area tersebut terdapat kandungan unsur Si= 17,86%, Al= 10,39, O=52,63%, Ca= 3,88%, Na= 8,31% dan Fe= 2,81%. Sedangkan Pada gambar a pada area 3 menunjukkan unsur penyusun permukaan di dekat partikel abu terbang. Dari hasil EDAX menunjukkan

unsur penyusun terdiri dari O= 47,51%, C= 9,59%, Si= 16,79%, Al= 8,10%, Ca= 7,44%, Na= 5,46%.

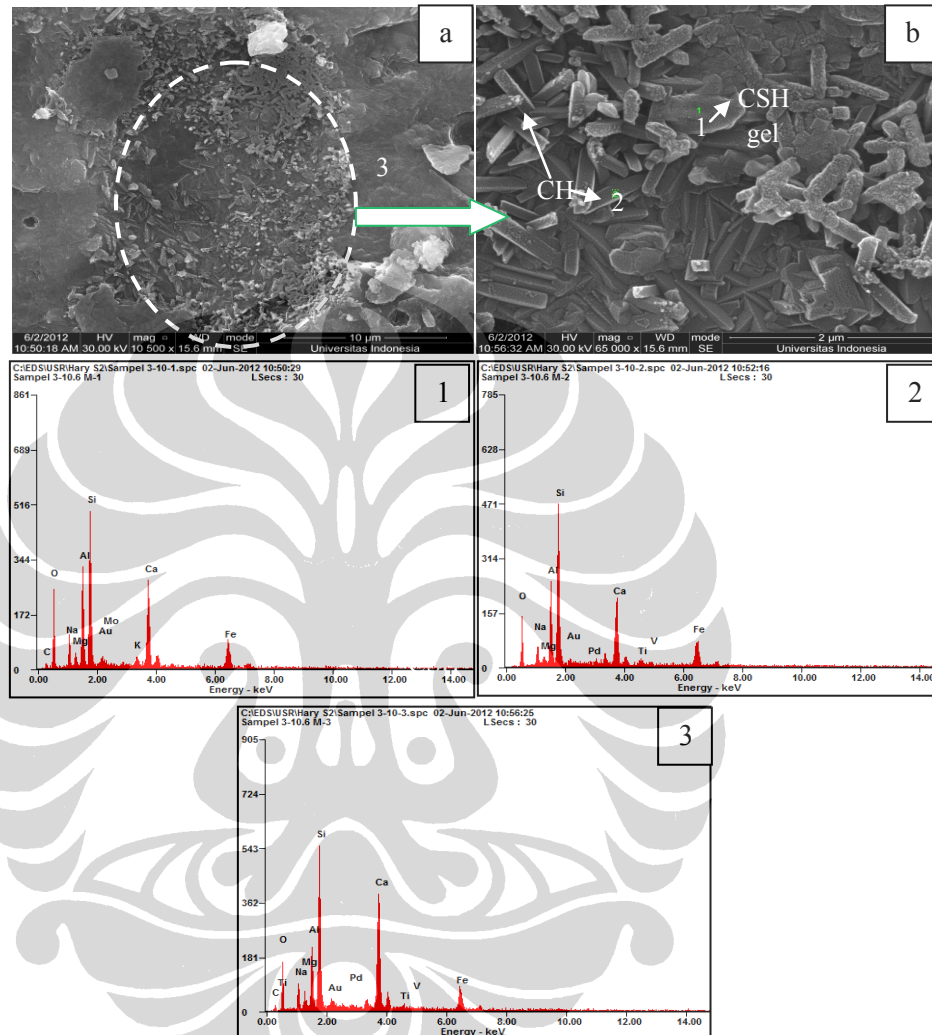


**Gambar 4.8.** Strukturmikro SEM pasta geopolimer pada konsentrasi larutan 8,6M pada campuran 0% Sf; a) perbesaran 8000x; a3) EDAX pada area 3 dan b) Perbesaran 65.000x; b1)EDAX pada area 1; b2) EDAX pada area 2

#### 4.3.1.2. Morfologi pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 10,5M

Pada gambar 4.9 merupakan morfologi permukaan patahan konsentrasi larutan 10,5M. Gambar a menunjukkan adanya perubahan struktur permukaan di area 3, diperkirakan

perubahan dari CSH gel menjadi kumpulan partikel dengan bentuk *crystal tubular* yaitu CH (*calcium hydroxide, portlandite*) [52].



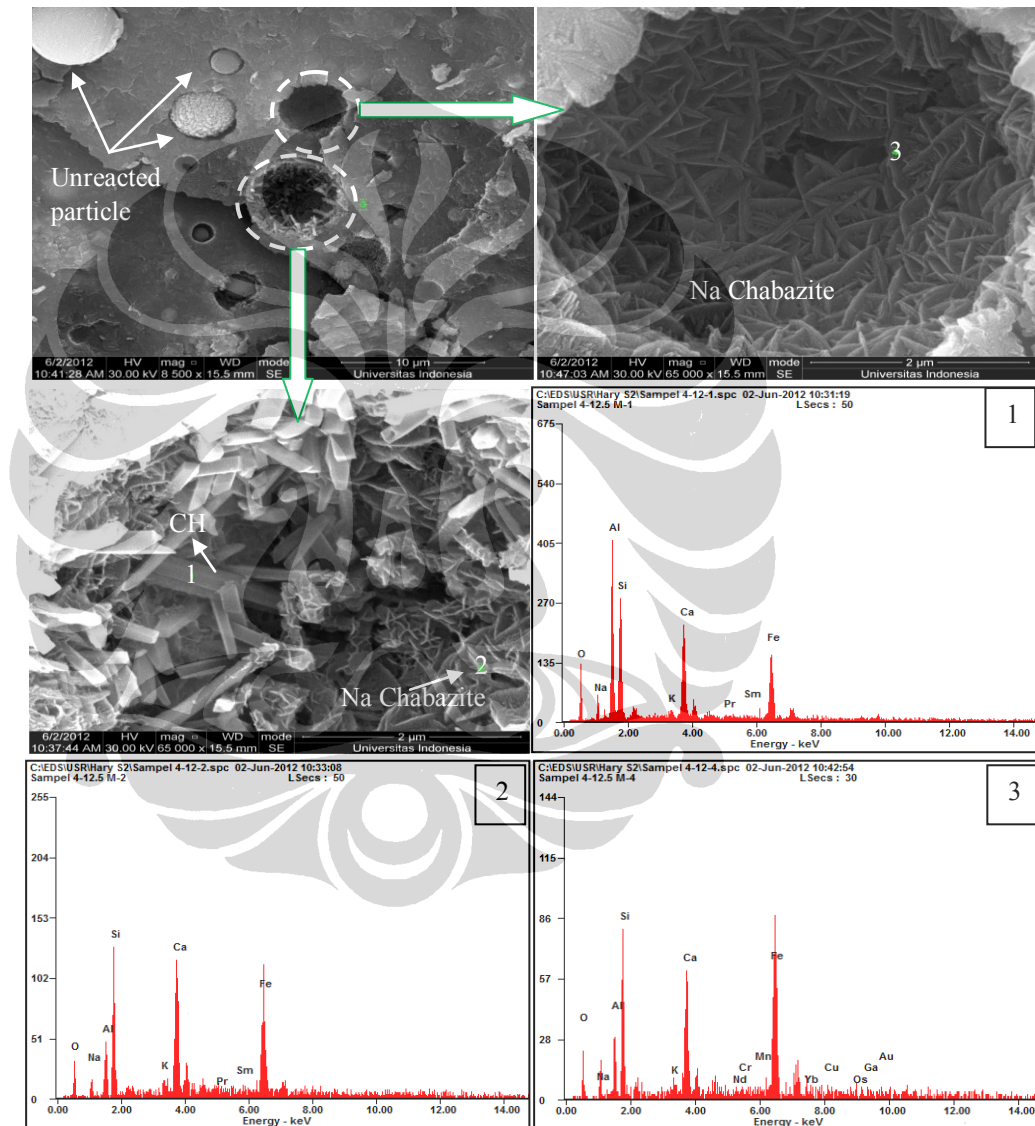
**Gambar 4.9.** SEM pasta geopolimer pada konsentrasi larutan 10,5M pada campuran 0% Sf; a) perbesaran 10.500x; a3) EDAX pada area 3 dan b) Perbesaran 65.000x; b1)EDAX pada area 1; b2) EDAX pada area 2.

Hasil EDAX pada area 3 menunjukkan adanya unsur penyusun Ca yang cukup besar yaitu Si= 18,20%, Al= 8,02%, O= 41,38%, C= 12,34% dan Ca= 8,41% dengan perbandingan rasio Si/Al= 2,27. Sedangkan pada gambar b merupakan perbesaran 65.000x pada area terbentuknya kristal serpihan/batang. Salah satu kristal kemudian di EDAX hasilnya ditunjukkan pada gambar 1, unsur penyusun terdapat pada area tersebut adalah C= 9,19%, O= 45,92%, Si= 17,31%, Al= 10,58% dan Ca= 5,67%.



Adanya unsur C, Ca dan O diindikasikan bahwa kristal dengan bentuk serpihan merupakan karbonasi yang menyebabkan terjadi *decalcification* di area tersebut [43]. Sedangkan area 2 pada gambar b terdiri dari unsur penyusun O= 43,33%, Si= 24,44%, Al= 11,64%, dan Na= 6,73%.

#### 4.3.1.3. Morfologi pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 12,5M



**Gambar 4.10.** Strukturmikro SEM pasta geopolimer pada konsentrasi larutan 12,5M pada campuran 0% Sf; a) perbesaran 8500x; b) Perbesaran 65,000x; b1) EDAX pada area 1; b2) EDAX pada area 2 dan c) perbesaran 65,000x; c3) EDAX pada titik 3.



Pada gambar 4.9 (a) merupakan strukturmikro pada konsentrasi larutan NaOH 12,5M dengan 0%SF. Gambar tersebut menunjukkan permukaan patahan memiliki struktur yang padat (*compact*), namun masih ditemui partikel abu terbang yang tidak bereaksi dan adanya dua lubang/rongga yang cukup besar yang diyakini sebagai bekas partikel abu terbang yang tidak bereaksi. Dari perbesaran 65.000x, pada gambar (b) terlihat bahwa struktur kristal yang tumbuh tersebut terdiri dari dua bentuk yaitu *crystals tubular* pada area 1 [44] dan struktur kristal seperti *Na-chabazite (herschelite)* pada area 2 [19]. Hasil EDAX di area 1 menunjukkan unsur penyusun dominan yaitu Al= 22,28%, Si= 20,79, O= 35,12%, Ca= 7,39%, Na= 6,08%, dan Fe= 7,18%. Sedangkan pada area 2 yang terdapat struktur kristal seperti *Na-chabazite* dengan unsur penyusunnya adalah Si= 22,08%, Al= 10,88%, O= 30,39%, Na= 7,66%, Ca= 13,77% dan Fe= 12,67%. Berdasarkan perbandingan rasio Si/Al= 2, membuktikan struktur kristal dipermukaan rongga/*void* adalah *Na-chabazite* [49]. Pada gambar c dengan perbesaran yang sama 65.000x menunjukkan permukaan lubang memiliki struktur *Na-Chabazite*. Hasil EDAX area 3 terdiri dari unsur penyusun yaitu Si= 20,03%, Al= 9,79%, O= 29,14%, Ca= 10,50%, Na= 7,21%, dan Fe= 16,36%. Berdasarkan hasil perbandingan rasio Si/Al= 2,05, membuktikan area 3 pada gambar c merupakan struktur kristal *Na-chabazite*.

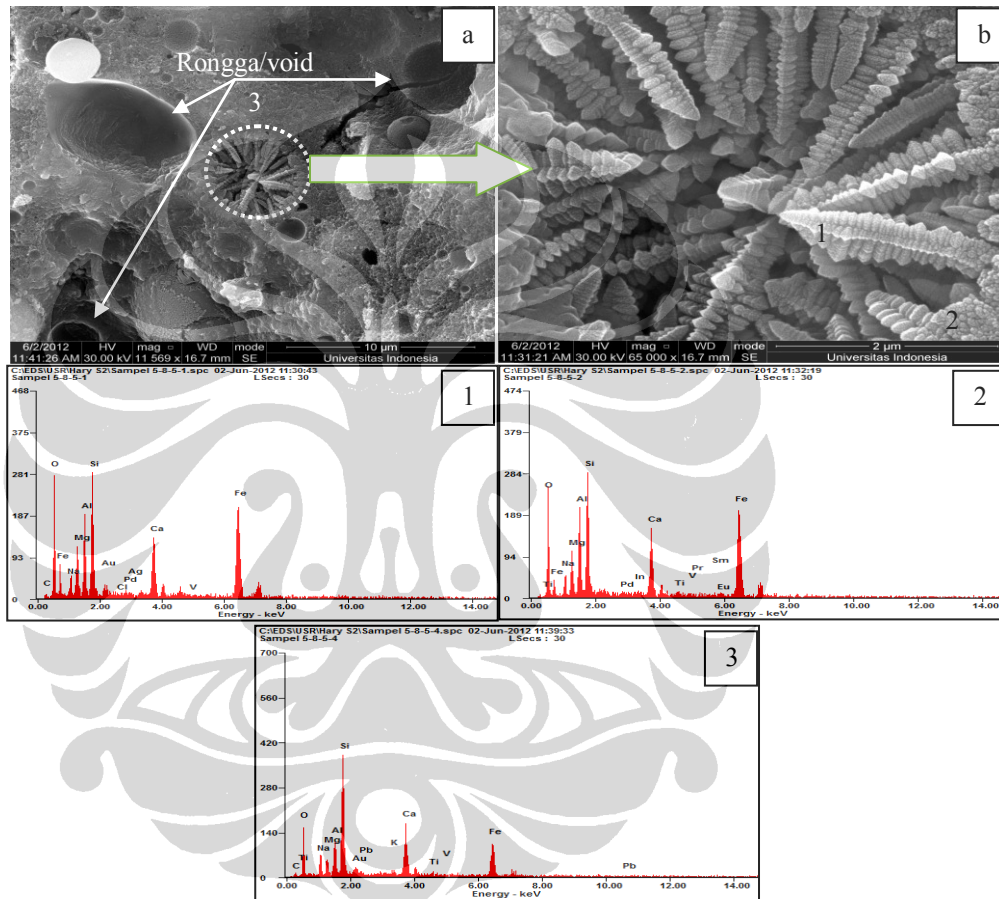
#### 4.3.2. Morfologi Pasta Geopolimer Berdasarkan % *Silica Fume*

Analisis morfologi pasta geopolimer berdasarkan % *silica fume* dilakukan pada pasta geopolimer dengan konsentrasi 8,6M dengan 5%Sf dan pasta geopolimer dengan konsentrasi 10,5M dengan 5%, 10%Sf dan 15%Sf.

##### 4.3.2.1. Morfologi konsentrasi 8,6M dengan 5%Sf

Pada gambar 4.11 memperlihatkan morfologi dari pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 8,6M dengan 5%Sf. Terbentuknya rongga/*void* yang besar menyebabkan kekuatan tekan mengalami penurunan pada pasta geopolimer dengan %Sf seperti terlihat pada gambar a. Namun hal yang menarik dari morfologi tersebut adalah terbentuknya kristal seperti *dendrite*, tumbuh menutupi rongga/*void* yang ditunjukkan pada gambar b. Salah satu kristal kemudian di EDAX pada area 1, hasil EDAX

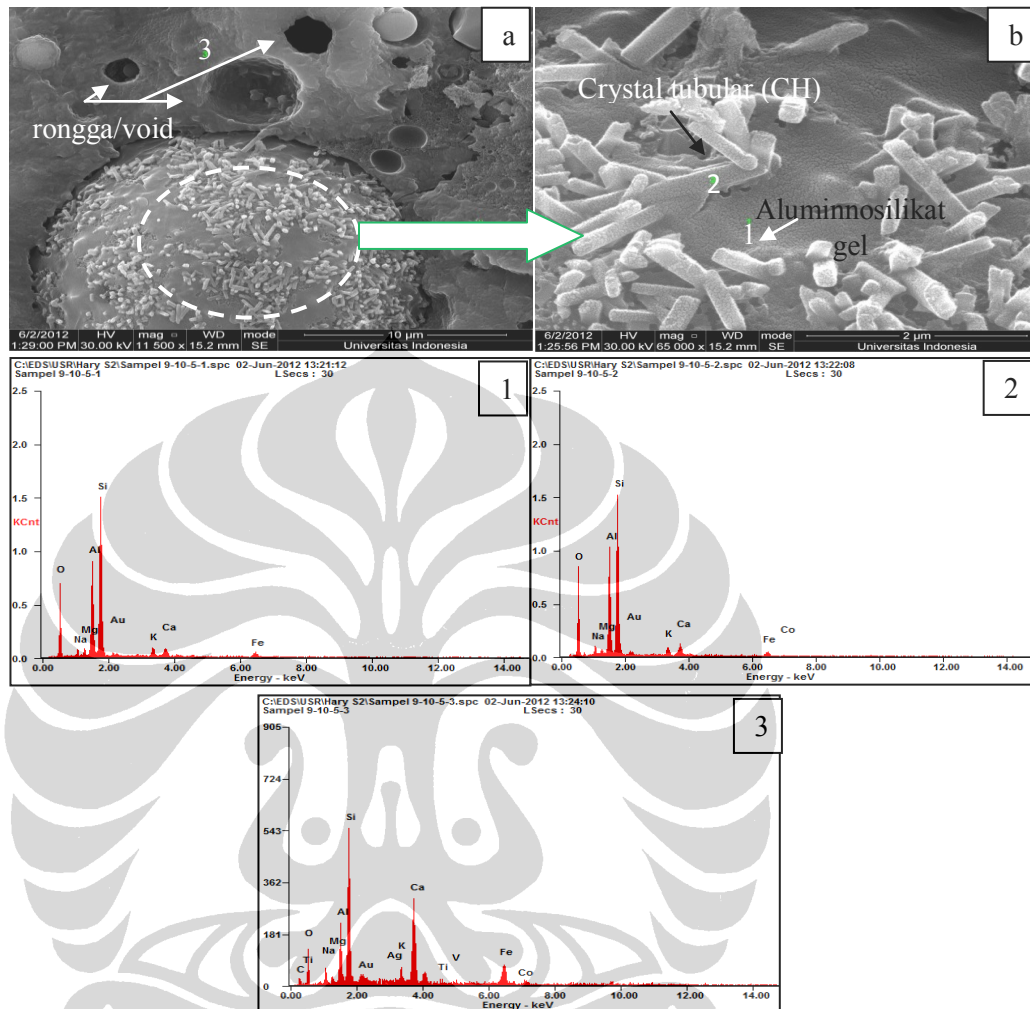
menunjukkan bahwa kristal seperti *dendrite* tersebut memiliki unsur penyusun yaitu Si= 12,33%, Al= 9,08, O= 48,30, Ca= 3,51%, Na= 3,79%, Mg= 6,95% dan Fe= 8,07%. Terbentuknya kristal seperti *dendrite* ini, kemungkinan akibat kehadiran Fe dan Mg sebagai unsur penyusunnya. Namun demikian, belum diketahui fasa mineral yang terbentuk.



**Gambar 4.11.** Strukturmikro SEM pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 8,6M pada campuran 5% Sf; a) perbessaran 11.569x; b) Perbesaran 65.000x; b1)EDAX pada area 1; b2) EDAX pada area 2; a3) EDAX pada area 3.

Sedangkan pada area 2 pada gambar b memiliki unsur penyusun yaitu Si= 16,15%, Al= 11,46%, O= 46,32%, Ca= 3,72%, Na= 4,99%, Mg= 7,24% dan Fe= 8,61%. Pada area 3 gambar a terdiri dari unsur penyusun Si= 20,46%, Al= 7,42%, O= 40,18%, Na= 7,19%, Ca= 4,73%, Mg= 4,24% dan Fe= 4,56% dengan perbandingan rasio Si/Al= 2,8 di permukaan sampel pasta geopolimer.

### 4.3.2.2. Morfologi pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 10,5M 5%Sf

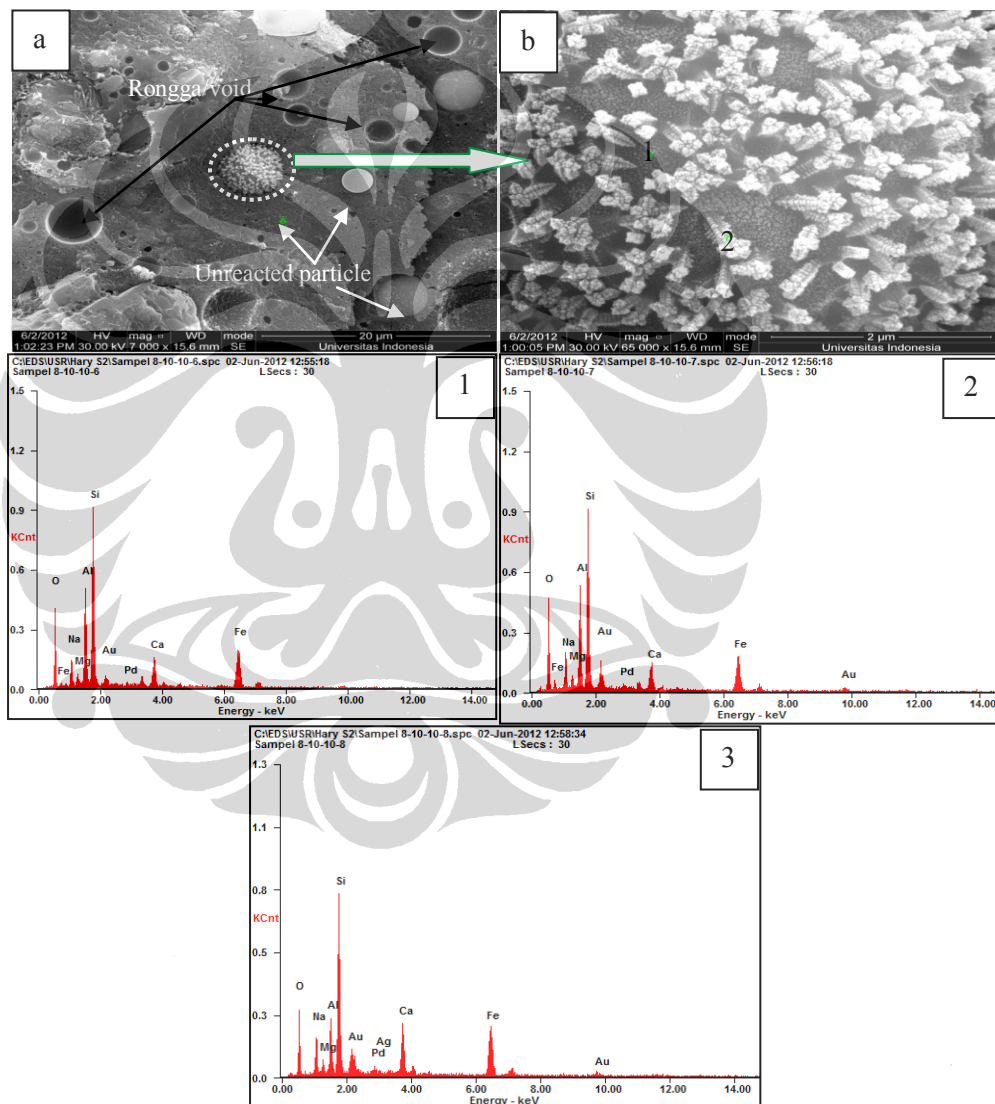


**Gambar 4.12.** Strukturmikro SEM pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M pada campuran 5%Sf ; a) perbesaran 11.500x; b) Perbesaran 65.000x; b1)EDAX pada area 1; b2) EDAX pada area 2; a3) EDAX pada area 3.

Gambar 4.12 a dan b merupakan strukturmikro pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 10,5M pada 5%Sf. Pada gambar a memiliki strukturmikro berongga/void yang besar dan juga terdapat partikel abu terbang berukuran besar yang tidak terdisolusi sedangkan gambar b menunjukkan perbesaran 65.000x, pada permukaan partikel abu terbang yang tidak terdisolusi terdapat kristal tubular, diperkirakan terbentuk dari aluminosilikat gel [44]. Penelusuran melalui EDAX pada area 1, menunjukkan unsur-unsur penyusunnya yaitu Si= 26,99%, Al= 13,53%, O= 54,12%, Ca= 1,05%, Na=

1,90%, dan pada area 2 menunjukkan unsur penyusun dominan adalah Si= 23,83%, Al= 13,68 dan O= 55,57%, Na= 2,53% dan Ca= 1,18%. Namun sebaliknya di area sekitar partikel yang tidak terlarut tersebut adalah Si= 21,51%, Al= 7,81%, O= 36,49%, Ca= 8,07%, Na= 4,35%, Fe= 3,13%, C= 14,34% dengan perbandingan rasio Si/Al= 2,7 di permukaan sampel pasta geopolimer.

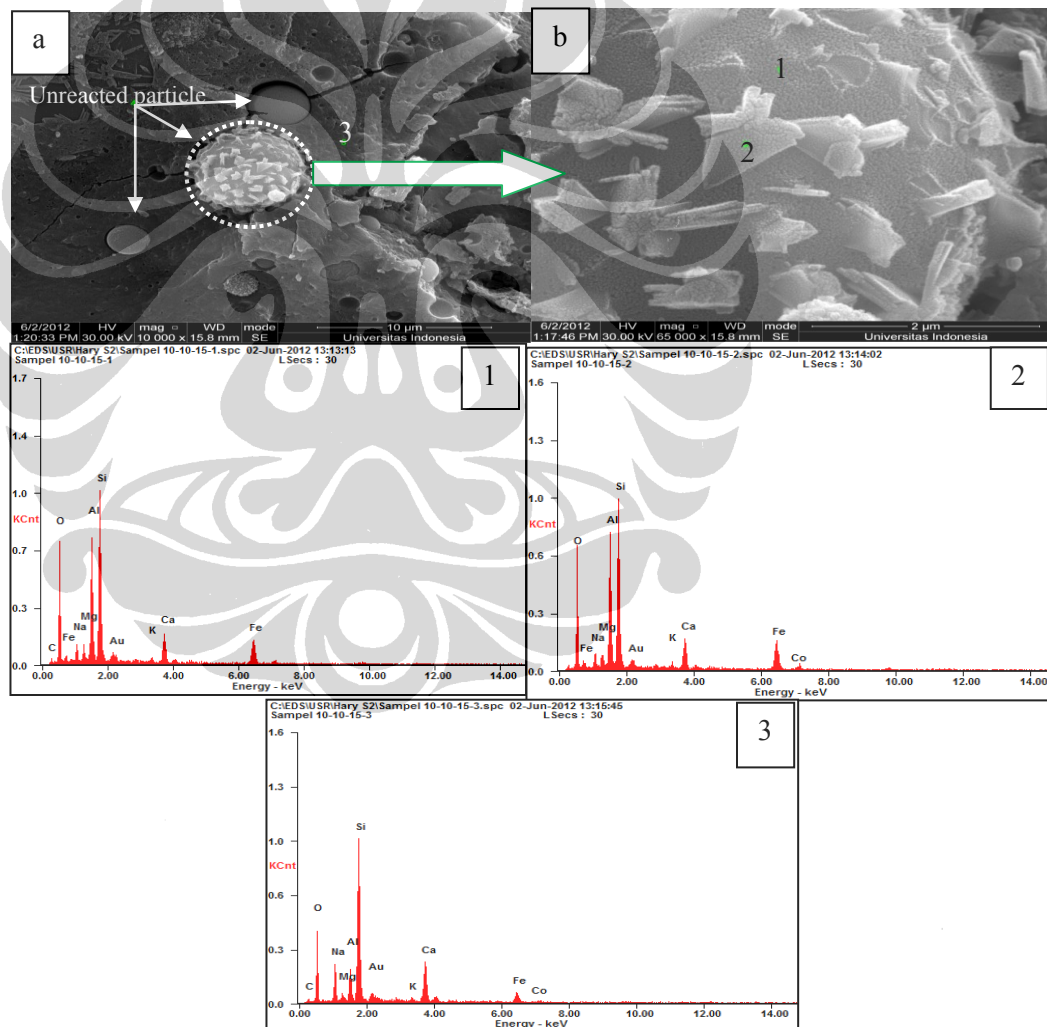
#### 4.3.2.3. Morfologi pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 10,5M 10%Sf



**Gambar 4.13.** Strukturmikro SEM pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M pada campuran 10% Sf ; a) perbesaran 7000x; b) Perbesaran 65.000x; b1) EDAX pada area 1; b2) EDAX pada area 2; a3) EDAX pada area 3.

Gambar 4.13 strukturmikro pasta geopolimer dengan 10,5M 10%Sf. Pada gambar a mikrostruktur tersebut terlihat banyak rongga bekas partikel dan partikel yang tidak terlarut dan gambar b menunjukkan salah satu perbesaran partikel abu terbang yang tidak terlarut. Penelusuran terhadap kristal berbentuk batang yang tumbuh dipermukaan partikel abu terbang pada area 1 dengan EDAX diperoleh unsur dominan Si= 24,17%, Al= 13,46%, O= 45,16%, Na= 7,23%, Ca= 2,47% dan Fe= 4,71% sedangkan pada titik 2 dengan unsur Si, Al, O dan Na. pada titik 3 disekitar partikel terdapat unsur Si, Al, Na, O dan Ca dengan perbandingan rasio Si/Al= 3,3

#### 4.3.2.4. Morfologi pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 10,5M 15%Sf



**Gambar 4.14.** Strukturmikro SEM pasta geopolimer pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M pada campuran 15% Sf; a) perbesaran 11.500x; b) Perbesaran 65.000x; b1) sEDAX pada area 1; b2) EDAX pada area 2; a3) EDAX pada area 3.

Gambar 4.14 merupakan strukturmikro pasta geopolimer dengan 10,5M 15%Sf. Pada gambar a terlihat partikel abu terbang yang ditumbuhi oleh partikel berbentuk serpihan, partikel yang tidak terlarut dan adanya retakan. Penelusuran EDAX terhadap partikel pada gambar b memperlihatkan unsur penyusun pada area 1 gambar b terdiri dari unsur Si= 17,35%, Al= 11,04%, O= 54,09%,C= 7,88%, Ca= 1,92%, Na= 3,04%, Mg= 1,68% dan Fe= 2,18%. pada area 2 gambar b partikel tumbuh menunjukkan unsur penyusun yaitu Si= 20,24%, Al= 14,14%, O= 54,71%, Ca= 1,97%, Na= 3,05%, Mg= 2,04% dan Fe= 2,92%. Sedangkan pada area 3 pada gambar a terdiri dari unsur Si= 19,43%, Al= 4,38%, O= 48,99%, C= 11,42%, Na= 8,88%, Ca= 3,37%, Mg= 1,41% dan Fe= 1,20% dengan perbandingan Si/Al= 4,4.

#### 4.4. Analisis Terhadap Karbonasi pada Pasta Geopolimer

Analisis ini ditujukan untuk menelusuri indikasi terbentuknya karbonasi berdasarkan konsentrasi larutan NaOH dan % *silica fume* terhadap karbonasi melalui pengujian AAS, XRD, FTIR dan SEM Mapping.

##### 4.4.1 Analisis AAS

Sebelum dilakukan pengujian AAS dilakukan proses preparasi sampel pengujian dengan proses *leaching* dimana serbuk pasta geopolimer dilarutkan kedalam *aquades* dengan perbandingan rasio 10mg/100ml = 100ppm. selanjutnya campuran *distirrer* selama 1 jam. Setelah pelarutan selesai, padatan dipisahkan dari larutan dengan kertas saring whatman 40. Penggunaan kertas saring ini dianggap dapat memisahkan sisa abu terbang yang tidak terlarut tetapi masih dapat melewati  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Ca}^{2+}$  yang terlarut. Filtrat yang diperoleh dianalisis dengan alat spektrofotometer serapan atom (AAS) . Hasil analisis AAS ditunjukkan pada tabel 4.2.

**Tabel 4.2.** Hasil uji AAS terhadap  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Ca}^{2+}$  terlarut

Kode Sampel	Silica fume (%)	Konsentrasi Larutan NaOH (M)	$\text{Na}^+$ (ppm)	$\text{Ca}^{2+}$ (ppm)
1	0	6,5	4,8	0,03
	5		1,3	0,026

**Tabel 4.2.** Hasil uji AAS terhadap  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Ca}^{2+}$  terlarut (lanjutan)

Kode Sampel	Silica fume (%)	Kosentrasi Larutan NaOH (M)	$\text{Na}^+$ (ppm)	$\text{Ca}^{2+}$ (ppm)
1	10	6,5	2,9	0,02
	15		3,3	0,017
2	0	8,6	2,7	0,00
	5		4,5	0,014
	10		2	0,00
	15		2,4	0,00
3	0	10,5	4,1	0,00
	5		2,9	0,00
	10		3,9	0,00
	15		3,2	0,013
4	0	12,5	3,2	0,00
	5		3,7	0,00
	10		3,2	0,00
	15		3,1	0,00

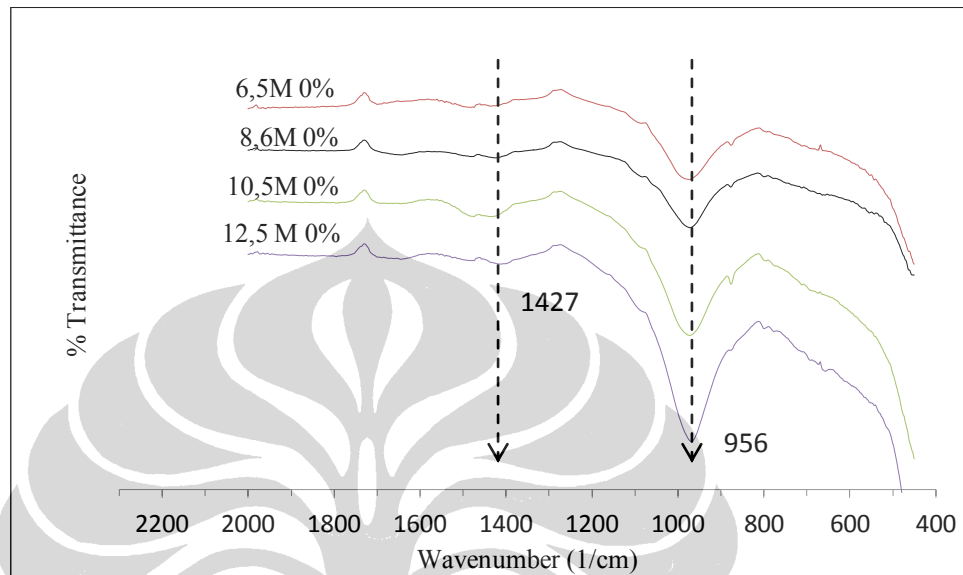
Dari hasil AAS terhadap pasta geopolimer dapat dilihat bahwa besarnya  $\text{Na}^+$  sisa yang terlarut dalam *aquades* pada setiap kosentrasi larutan tidak terlihat trennya akan tetapi dilihat dari semakin besarnya kosentrasi larutan akan menghasilkan sisa  $\text{Na}^+$  lebih sedikit, berdasarkan tabel 4.2 kosentrasi larutan NaOH 12,5M memiliki nilai kelarutan yang sedikit dibandingkan kosentrasi larutan NaOH lain. Namun sebaliknya terhadap  $\text{Ca}^{2+}$  yang terlarut pada *aquades* dapat dilihat bahwa semakin tinggi kosentrasi larutan NaOH maka kelarutan  $\text{Ca}^{2+}$  dalam *aquades* sangat kecil bahkan tidak terdeteksi dengan artian bahwa tingkat kelarutan Ca dalam proses disolusi dalam geopolimerisasi tinggi dengan semakin tingginya kosentrasi larutan NaOH. Sehingga bisa diprediksi bahwa karbonasi yang terjadi pada pasta geopolimer berasal dari unsur  $\text{Na}^+$ .

#### 4.4.2. Analisis FTIR

Analisis dengan Spektroskopi Inframerah Fourier Transform (FTIR) dilakukan untuk mengetahui ikatan kimia yang terjadi pada pasta geopolimer. Sampel yang diuji adalah pasta geopolimer yang memiliki kuat tekan optimum. Sampel yang dipilih



untuk uji FTIR adalah pasta geopolimer yang disintesis tanpa menggunakan *silica fume* pada konsentrasi larutan NaOH 6,5M, 8,6 M, 10,5M dan 12,5M dan pasta geopolimer disintesis dengan menggunakan *silica fume*.

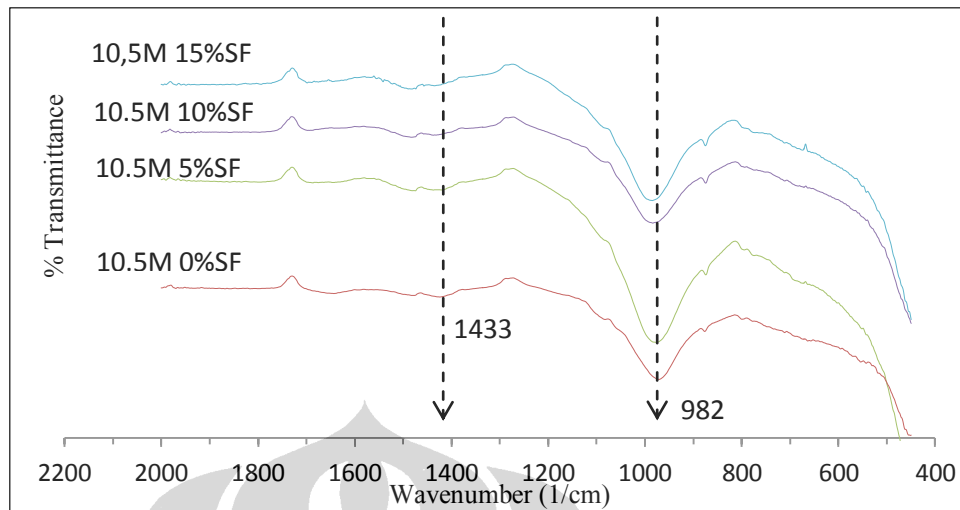


**Gambar 4.15.** Spektra IR pasta geopolimer tanpa silica fume

Gambar 4.15 merupakan spektra IR pasta geopolimer tanpa menggunakan *silica fume*. Data yang dihasilkan dalam pengujian FTIR berupa intensitas serapan (%T) dan bilangan gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ ). Pada gambar tersebut terdapat vibrasi ulur pada bilangan gelombang  $1427 \text{ cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi ulur untuk O-C-O. namun terbentuknya vibrasi ulur O-C-O ini belum terlihat jelas pada pasta geopolimer dengan konsentrasi larutan NaOH 6,5M, 8,6M, 10,5M dan 12,5M yang berumur 7 hari. Sedangkan pada vibrasi ulur pada bilangan gelombang  $956 \text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi ulur (*stretching*) (Si-O-Si, Si-O-Al). Pada vibrasi ulur (Si-O-Si, Si-O-Al) yang terbentuk menunjukkan bahwa konsentrasi larutan NaOH 12,5M memiliki vibrasi ulur (Si-O-Si, Si-O-Al) lebih kuat dibandingkan dengan konsentrasi larutan NaOH 10,5M, 8,6M dan 6,5M.

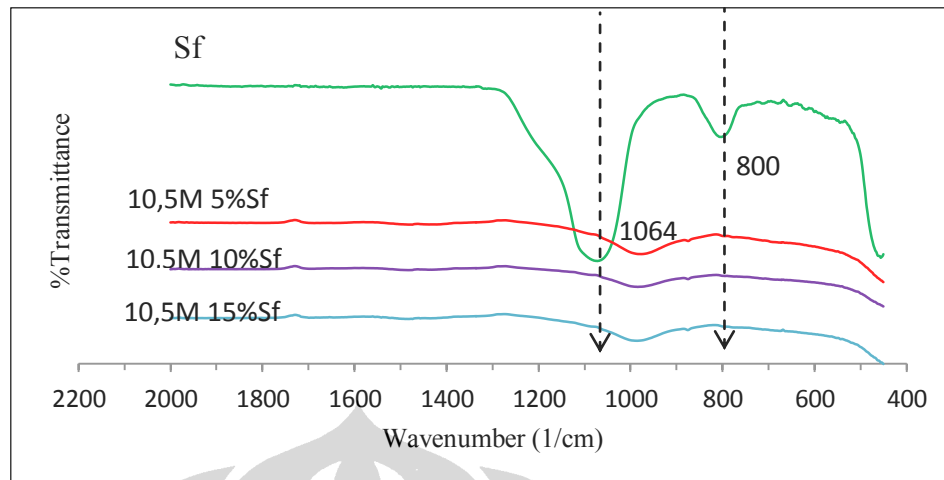
Untuk pasta geopolimer dengan menggunakan *silica fume* pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M ditunjukkan oleh Gambar 4.16.





Gambar 4.16. Spektre IR pasta geopolimer berdasarkan % *silica fume*

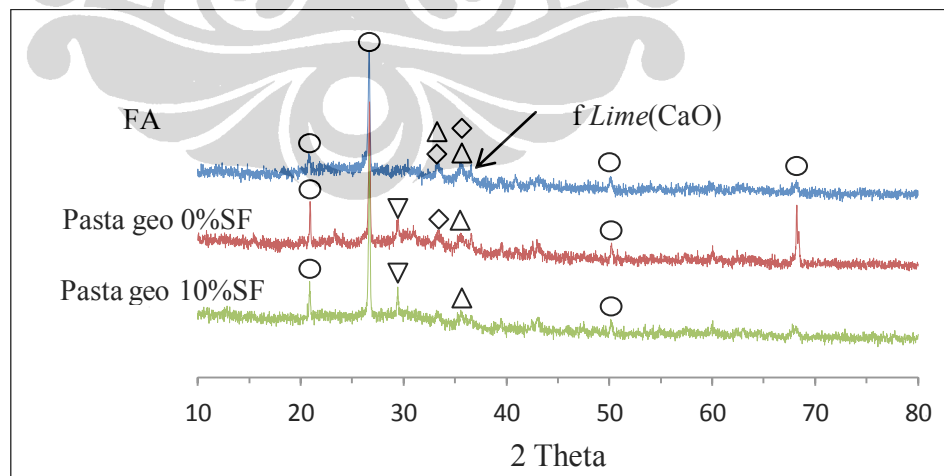
Vibrasi ulur pada bilangan gelombang  $1433\text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi ulur untuk O-C-O. Ikatan O-C-O ini berasal dari  $\text{NaCO}_3$  atau  $\text{CaCO}_3$ . Sedangkan untuk vibrasi ulur dengan bilangan gelombang  $982\text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi ulur (*stretching*) (Si-O-Si, Si-O-Al). Dari hasil analisis pengujian FTIR terhadap pasta geopolimer berdasarkan %Sf dapat disimpulkan bahwa penggantian sebagian abu terbang dengan *silica fume* sedikit membantu terhadap terbentuknya ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al dilihat dari kedalaman vibrasi ulur yang dihasilkan dibandingkan dengan tanpa *silica fume*. Kedalaman cekungan pita vibrasi ulur yang tinggi dihasilkan oleh 5%Sf. Namun kenyataannya ikatan Si-O-Si ini tidak membantu dalam peningkatan kekuatan tekan yang dihasilkan. Sedangkan pengaruh %Sf terhadap terbentuknya karbonasi juga tidak berpengaruh namun sebaliknya pada umur 7 hari pada pasta geopolimer menunjukkan pita vibrasi ulur ikatan O-C-O sudah mulai terbentuk. Sedangkan pada gambar 4.17 hanya memperkuat pernyataan bahwa penggantian *silica fume* terhadap abu terbang untuk memperoleh suplai Si tidak mempunyai pengaruh terhadap ikatan pasta geopolimer, walaupun ada itupun sangat kecil sekali malahan cenderung merugikan seperti terlihat dalam hasil analisis terhadap kekuatan tekan yang terbentuk.



**Gambar 4.17.** Spektra IR pasta geopolimer berdasarkan % *silica fume*, Fa dan Sf

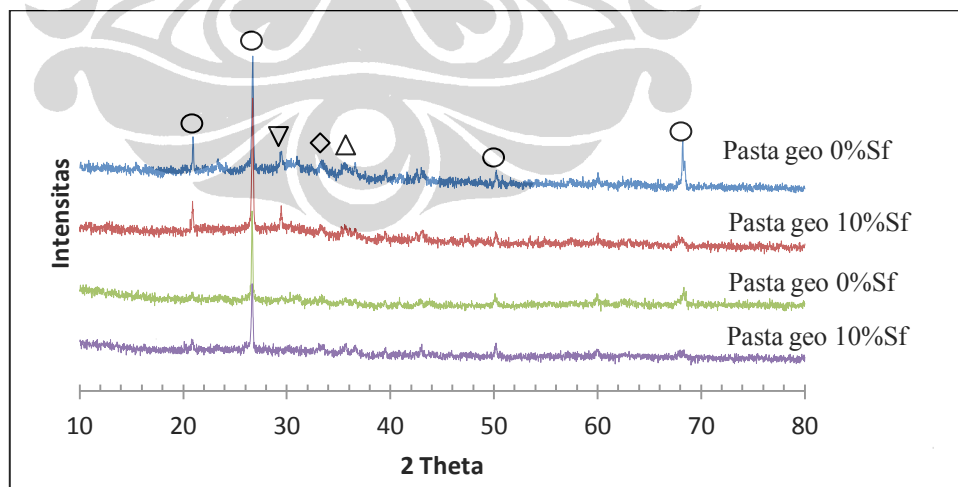
#### 4.4.3. Analisis fasa dengan XRD

Analisis terhadap fasa yang terdapat pada pasta geopolimer dilakukan pada sampel dengan konsentrasi larutan NaOH 10,5M yaitu pada 0%Sf dan 10% Sf. Analisis ini menggunakan sudut difraksi ( $2\theta$ ) antara  $10-80^\circ$ . Data yang dihasilkan seperti yang terlihat pada gambar 4.18, lalu dianalisis jenis mineral dengan cara mencocokkan sudut difraksi dengan pola difraktogram *basis data crystallography open database* (COD) tertanggal maret 2012 pada peranti lunak Match! (*Crystal Impact software, versi 1.11d*).



**Gambar 4.18.** Difraktogram X-ray: abu terbang dan pasta geopolimer 0% Sf dan pasta geopolimer 10% SF dimana (○)  $\text{SiO}_2$  (*quartz*), (▽)  $\text{CaCO}_3$  (*calcite*), (◇)  $\text{F}_3\text{O}_4$  (*magnetite*), (△)  $\text{Al}_{2,34}\text{O}_{4,83}\text{Si}_{0,66}$  (*mullite*), *free lime* (CaO).

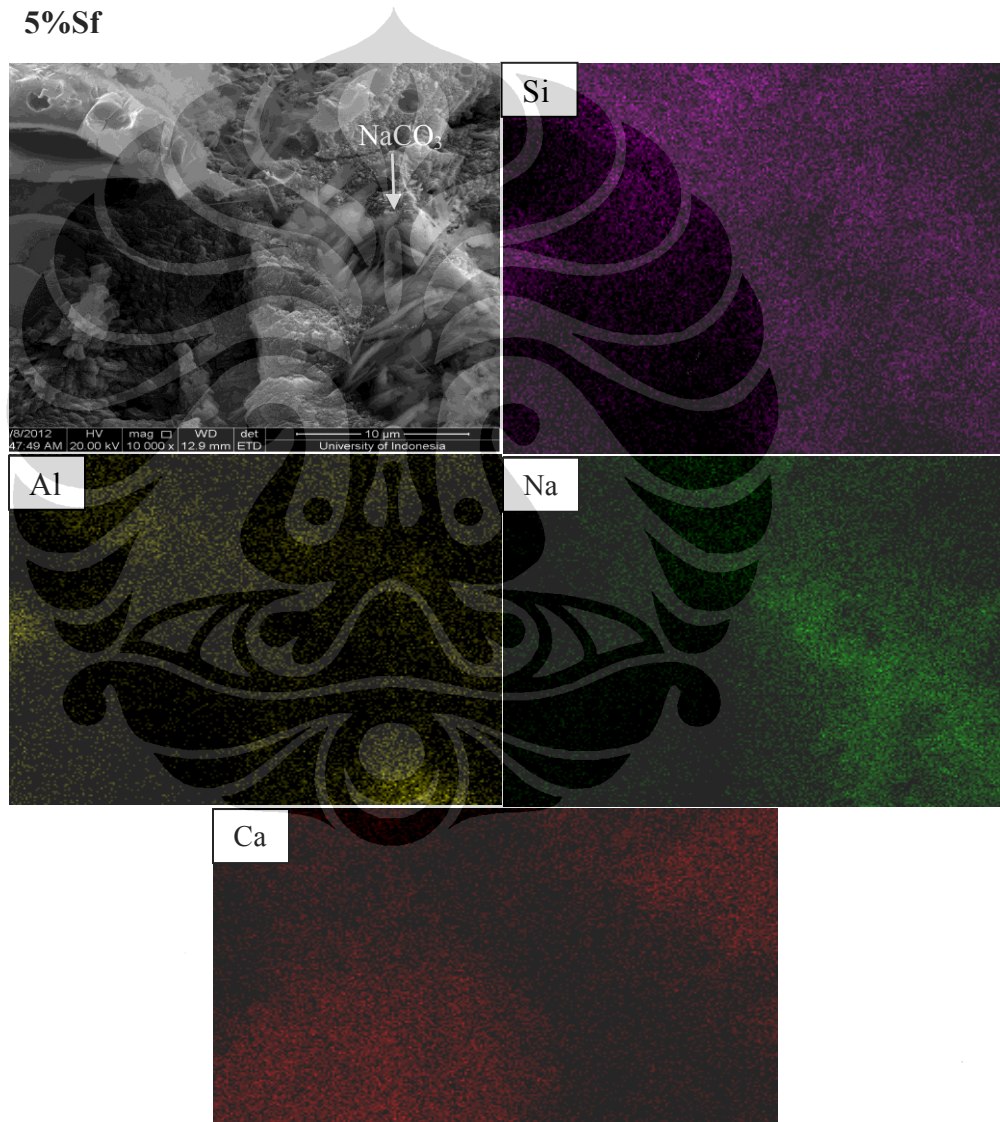
Pada gambar 4.18 menunjukkan difraktogram dari abu terbang, pasta geopolimer 0%Sf dan pasta geopolimer 10%Sf. Hasil difraktogram menunjukkan, fasa mineral kristalin *quartz* ( $\text{SiO}_2$ ) tidak mengalami perubahan setelah diaktivasi oleh larutan alkali [44]. Fasa mineral kristalin *quartz* pada abu terbang terdapat di  $2\Theta = 26,62^\circ$ ,  $2\Theta = 50,12^\circ$ ;  $2\Theta = 68,30^\circ$  Untuk fasa mineral kristalin *mullite* pada  $2\Theta = 33,44^\circ$ ,  $2\Theta = 35,26^\circ$ ,  $2\Theta = 40,86^\circ$ , fasa mineral kristalin *magnetite*  $2\Theta = 33,44^\circ$ ,  $2\Theta = 35,26^\circ$  dan terdeteksi puncak yang mengindikasikan fasa mineral kristalin CaO (*Lime*) bebas pada  $2\Theta = 36,52^\circ$ . Pada fasa mineral kristalin *quartz* abu terbang 0%Sf yang telah mengalami aktivasi oleh larutan alkali merubah pergeseran puncak fasa mineral kristalin dengan pergeseran yang sangat kecil yaitu pada  $2\Theta = 20,85^\circ$ ,  $2\Theta = 26,63^\circ$  dan  $2\Theta = 67,73^\circ$ . Disamping itu, munculnya beberapa puncak baru dengan intensitas yang kecil seperti fasa mineral kristalin *calcite* pada  $2\Theta = 29,39^\circ$ . Namun puncak fasa mineral kristalin *calcite* mengalami peningkatan intensitas pada pasta geopolimer 10%Sf. Perubahan ini menunjukkan bahwa semakin besar %Sf pada pasta geopolimer membuat terjadinya peningkatan karbonasi  $\text{CaCO}_3$ . Hal ini diperkirakan semakin besar  $\text{CO}_2$  yang terdifusi kedalam matrik pasta geopolimer karena meningkatnya pori-pori yang terbentuk pada pasta geopolimer dengan 10%Sf dimana fasa mineral kristalin *calcite* terdapat pada  $2\Theta = 29,41^\circ$ .



**Gambar 4.19.** Difraktogram X-ray: pasta geopolimer dan serbuk sisa leaching, pada 0% Sf dan 10% Sf dimana (○)  $\text{SiO}_2$  (*quartz*), (▽)  $\text{CaCO}_3$  (*calcite*), (◇)  $\text{F}_3\text{O}_4$  (*magnetite*), (△)  $\text{Al}_{2.34}\text{O}_{4.83}\text{Si}_{0.66}$  (*mullite*)

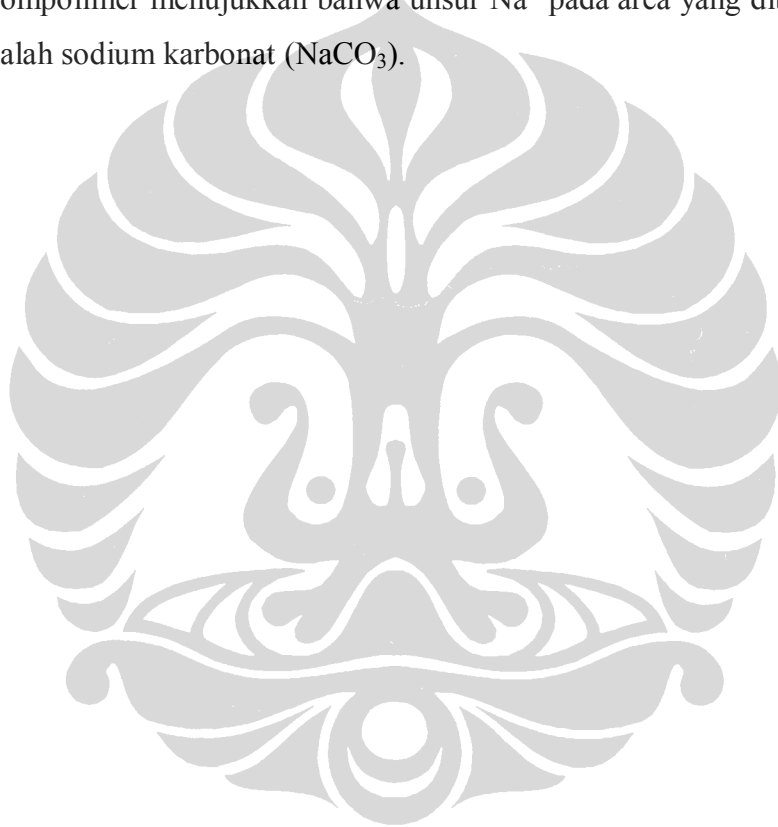
Sedangkan pada gambar 4.19 merupakan difraktogram antara pasta geopolimer dengan difraktogram yang berasal dari serbuk pasta geopolimer dari sisa *leaching* pengujian AAS. Hasil difraktogram menunjukkan perubahan intensitas pada serbuk sisa *leaching* pasta geopolimer dengan 0%Sf dan 10%Sf. Penurunan intensitas kristalin terjadi pada mineral *quartz* pada  $2\theta = 26,62^\circ$  dan  $2\theta = 68,30^\circ$  sedangkan puncak-puncak lain menghilang atau larut kedalam *aquades* ketika proses *leaching*.

#### 4.5. Analisis SEM *Mapping* Pasta Geopolimer Kosentrasi Larutan 10,5M pada 5%Sf



**Gambar 4.20.** SEM *Mapping* pada pasta geopolimer 10,5M dengan 5%Sf

Gambar 4.20 merupakan SEM *mapping* pada morfologi dari pasta geopolimer konsentrasi larutan 10,5M dengan 5%Sf. Hasil morfologi pada pasta geopolimer memperlihatkan permukaan rongga/*void* dan ditumbuhi dengan partikel berbentuk jarum [53]. Analisis terhadap morfologi pasta geopolimer dengan penggunaan %Sf menimbulkan terbentuknya rongga pada pasta geopolimer, kehadiran rongga ini memudahkan CO<sub>2</sub> menyusup kedalam matrik geopolimer dan bereaksi dengan sisa Na<sup>+</sup> dan Ca<sup>2+</sup> membentuk karbonasi. Proses *mapping* dilakukan terhadap pasta geopolimer menunjukkan bahwa unsur Na<sup>+</sup> pada area yang ditumbuhi partikel jarum adalah sodium karbonat (NaCO<sub>3</sub>).



## BAB 5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Telah dilakukan sintesis geopolimer berbahan abu terbang dengan variasi *silica fume* 0%, 5%, 10% dan 15% pada konsentrasi larutan NaOH 6,5M, 8,6M, 10,5M dan 12,5M menggunakan proses metoda terpisah serta proses *curing* pasta geopolimer pada temperatur 60°C selama 24 jam dan 7 hari pada temperatur ruang.
2. Hasil Uji XRF dan XRD terhadap analisis prekursor awal abu terbang dan *silica fume* menunjukkan bahwa komposisi kimia abu terbang PLTU Suralaya termasuk abu terbang jenis C dengan kandungan CaO 19,26 % (CaO > 10%) sedangkan hasil uji XRD menunjukkan abu terbang memiliki fasa *amorf* pada  $2\Theta = 15-38^\circ$  dengan fasa kristalin terdiri dari mineral *quartz*, *mullite*, *magnetite* dan *lime free*, untuk *silica fume* memiliki fasa amorf pada  $2\Theta = 15-40^\circ$  dengan fasa kristalin mineral dari *quartz* dan *magnetite*.
3. Pengujian Sifat mekanik berupa kekuatan tekan dan kekuatan lentur terhadap pasta geopolimer menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi larutan NaOH maka semakin besar kekuatan tekan yang dihasilkan yaitu 60,4 MPa pada konsentrasi 12,5M. Akan tetapi kekuatan tekan menurun ketika ditambahkan *silica fume* 5%, 10% dan 15%, hal yang sama juga terjadi dengan kekuatan lentur pasta geopolimer. Penurunan ini disebabkan oleh banyaknya rongga (*void*) yang terdapat pada pasta geopolimer akibat terperangkapnya udara.
4. Pengujian morfologi dilakukan pada pecahan pasta geopolimer yang telah mengalami uji tekan pada sampel uji berdasarkan konsentrasi larutan NaOH tanpa *silica fume* dan variasi *silica fume* pada konsentrasi larutan NaOH 10,5M, menunjukkan bahwa struktur permukaan dengan variasi *silica fume* memiliki rongga/*void* yang lebih banyak dibandingkan dengan tanpa *silica fume*.

Sedangkan untuk terbentuknya struktur kristal karbonat belum begitu tampak pada pasta geopolimer yang berumur 7 hari.

5. Pengujian AAS untuk melihat kelarutan sisa  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Ca}^{2+}$  pasta geopolimer dalam *aquades* menunjukkan tingkat kelarutan untuk  $\text{Ca}^{2+}$  semakin sedikit dengan meningkatnya konsentrasi larutan NaOH sebaliknya untuk  $\text{Na}^+$  tingkat kelarutan tidak begitu mencolok setiap konsentrasi tetapi disimpulkan bahwa kelarutan  $\text{Na}^+$  lebih besar berdasarkan konsentrasi larutan NaOH yaitu 12,5M.
6. Pembuktian adanya karbonasi dilanjutkan dengan pengujian FTIR untuk mengetahui ikatan kimia yaitu O-C-O. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa indikasi terjadinya karbonasi berdasarkan pita vibrasi ulur O-C-O yang terbentuk pada konsentrasi larutan NaOH yaitu 6,5M, 8,6M, 10,5M dan 12,5M tanpa %Sf belum begitu terlihat pada umur 7 hari. Namun pada pasta geopolimer konsentrasi larutan NaOH 10,5M pada variasi %Sf dari 5%, 10% dan 15% sudah memiliki pita vibrasi ulur O-C-O yang kecil.
7. Pengujian XRD dilakukan pada sampel pasta geopolimer untuk mengetahui jenis senyawa karbonasi yang terbentuk. Hasil pengujian XRD pada pasta geopolimer dengan konsentrasi larutan NaOH 10,5M pada 0%Sf dan 10%Sf menunjukkan terbentuknya fasa mineral kristalin dari  $\text{CaCO}_3$  (*Calcite*). Tapi fasa kristalin untuk mineral  $\text{NaCO}_3$  belum begitu terlihat.

## DAFTAR REFERENSI

1. Ketlogetswe, C.; Mothudi, T. H., Strategies for Reducing Carbon Dioxide Emissions - The Case of Botswana Rural Communities. In *Encyclopedia of Energy Research*, Zenfora, A. L., Ed. Nova Science Publishers Inc.: 2010; pp 231-244.
2. J.T.Houghton, G.J.Jenkins, and J.J.Ephraums, eds. *Climate Change*. The IPCC Scientific Assessment. 1990, Cambridge University Press. 414.
3. Princiotta, F. T., *Global Climate Change -The Technology Challenge*. Springer: 2011; p 433.
4. IEA, *CO2 Emissions from Fuel Combustion*. 2009 ed.; International Energy Agency: Paris, 2009.
5. IEA, *CO2 Emissions From Fuel Combustion*. 2011 ed.; International Energy Agency: Paris, 2011; p 134.
6. Gleeson, B.; Low, N., *Governing for the Environment*. Palgrave: 2001; p 271.
7. J.Duchesne; Duong, L.; Bostrom, T.; Frost, R., Microstructure Study of Early In Situ Reaction of Fly Ash Geopolymer Observed by Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM). *Waste Biomass Valor* **2010**, *1*, 367-377.
8. Criado, M.; Palomo, A.; Fernández-Jiménez, A.; Banfill, P. F. G., Alkali activated fly ash: effect of admixtures on paste rheology. *Springer* **2009**, *19*, 447-455.
9. Criado, M.; Palomo, A.; Fernández-Jiménez, A., Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel* **2005**, *84*, 2048-2054.
10. Khale, D.; Chaudhary, R., Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *J Mater Sci* **2007**, *42*, 729-746.
11. Guo, X.; Shi, H.; Dick, W. A., Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement & Concrete Composites* **2010**, *32*, 142-147.
12. Sumajouw, D. M. J.; Hardjito, D.; Wallah, S. E.; Rangan, B. V., Fly ash-based geopolymer concrete: study of slender reinforced columns *Journal of Materials Science* **2006**, *42*, 729-746.
13. McLellan, B. C.; Williams, R. P.; Lay, J.; Riessen, A. v.; Corder, G. D., Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production* **2011**, 1080 -1090.
14. IEA, *CO2 Emissions from Fuel Combustion*. 2008 ed.; International Energy Agency: Paris, 2008; p 152.



15. Chindaprasirt, P.; Chareerat, T.; Sirivivatnanon, V., Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement & Concrete Composites* **2007**, *29*, 224–229.
16. Deventer, J. S. J. v.; Provis, J. L.; Duxson, P.; Brice, D. G., Chemical Research and Climate Change as Drivers in the Commercial Adoption of Alkali Activated Materials. *Waste Biomass Valor* **2010**, *1*, 145–155.
17. ICN. Industri Semen mulai Ekspansi *Monthly report* [Online], 2010, p. 18.
18. Zaharaki, D.; Komnitsas, K.; Perdikatsis, V., Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition. *J Mater Sci* **2010**, *45*, 2715–2724.
19. Duxson, P.; Ferná'ndez-Jime'nez, A.; Provis, J. L.; Lukey, G. C.; Palomo, A.; Deventer, J. S. J. v., Geopolymer technology: the current state of the art. *J Mater Sci* **2007**, *42*, 2917–2933.
20. Fletcher, R. A.; MacKenziea, K. J. D.; Nicholsona, C. L.; Shimada, S., The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of the European Ceramic Society* **2005**, *25*, 1471–1477.
21. Pnias, D.; Giannopoulou, I. P.; Perraki, T., Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* **2007**, *301*, 246–254.
22. Swanepoel, J. C.; Strydom, C. A., Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry* **2002**, *17*, 1143–1148.
23. Xu, H.; Deventer, J. S. J. V., Microstructural characterisation of geopolymers synthesised from kaolinite/stilbite mixtures using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX, and HREM. *Cement & Concrete Research* **2002**, *32*, 1705–1716.
24. Davidovits, J., Geopolymers: man-made rocks geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. *J. Mater. Educ.* **1994**, *16*, 91–139.
25. Wang, H.; Li, H.; Yan, F., Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* **2005**, *268*, 1–6.
26. Provis, J. L.; Deventer, J. S. J. v., Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling. *Chemical Engineering Science* **2007**, (62), 2318–2329.
27. Thokchom, S.; Dutta, D.; Ghosh, S., Effect of Incorporating Silica Fume in Fly Ash Geopolymers. *World Academy of Science, Engineering and Technology* **2011**, *60*.
28. Rattanasak, U.; Chindaprasirt, P., Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering* **2009**, *22*, 1073–1078.

29. Somna, K.; Jaturapitakkul, C.; Kajitvichyanukul, P.; Chindapasirt, P., NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel* **2011**, *90*, 2118–2124.
30. Ridtirud, C.; Chindapasirt1, P.; Pimraksa, K., Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* **2011**, *18*, 100.
31. Wang, S., Application of solid ash based catalyst in heterogeneous catalysis. *Environ. Sci. Technol* **2008**, (42), 7055-7063.
32. Fernandez-Jimenez, A.; Palomo, A., Characterisation of fly ashes potential reactivity as alkaline cements. *Fuel* **2003**, *82*, 2259-2265.
33. Deventer, J. S. J. v.; Provis, J. L.; Duxson, P.; Lukey, G. C., Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of Hazardous Materials* **2007**, *A139*, 506-513.
34. Komnitsas, K.; Zaharaki, D., Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry *Minerals Engineering* **2007**, *20*, 1261-1277.
35. Yip, C. K.; Lukey, G. C.; Deventer, J. S. J. V., The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research* **2005**, *35* (9), 1688-1697.
36. Siddique, R.; Khan, M. I., *Supplementary Cementing Materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011: New York, 2011.
37. Siddique, R., Review - Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling* **2011**, *55*, 923 –932.
38. Winnefeld, F.; Leemann, A.; Lucuk, M.; Svoboda, P.; Neuroth, M., Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials. *Construction and Building Materials* **2010**, *24*, 1086-1093.
39. Chindapasirt, P.; Silva, P. D.; Sagoe-Crentsil, K.; Hanjitsuwan, S., Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *J Mater Sci* **2012**, *47*, 4876-4883.
40. Davraz, M.; Gunduz, L., Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete. *Cement and Concrete Research* **2005**, *22*, 1251–1261.
41. Pacheco-Torgal, F.; Castro-Gomes, J.; Jalali, S., Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials* **2008**, *22*, 1315-1322.
42. Fansuri, H.; Swastika, N.; Atmaja, L., Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton. *Akta Kimindo* **2008**, *3*, 61-66.

43. Bernal, S. A.; Gutierrez, R. M. d.; Provis, J. L.; Rose, V., Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags. *Cement and Concrete Research* **2010**, *40*, 898-907.
44. Park, S.-S.; Kang, H.-Y., Characterization of fly ash-pastes synthesized at different activator conditions. *Korean J. Chem. Eng.* **2008**, *25*, 78-73
45. Alvarez-Ayuso, E.; Querol, X.; Plana, F.; Alastuey, A.; Moreno, N.; Izquierdo, M.; Font, O.; Moreno, T.; Diez, S.; Vazquez, E.; Barra, M., Environmental, Physical and structural characterisation of geopolymer matrices synthesised from coal (co-) combustion fly ashes. *Journal of Hazardous Materials* **2008**, *154*, 175-183.
46. Antiohos, S.; Papageorgiou, A.; Tsimas, S., Activation of fly ash cementitious systems in the presence of quicklime. Part II: Nature of hydration products, porosity and microstructure development. *Cement and Concrete Research* **2006**, *36*, 2123-2131.
47. Houston, J. R.; Maxwell, R. S.; Carroll, S. A., Transformation of meta-stable calcium silicate hydrates to tobermorite: reaction kinetics and molecular structure from XRD and NMR spectroscopy. *Geochemical Transaction* **2009**.
48. Wada, N.; Nakamurab, M.; Tanakab, Y.; Kanamuraa, K.; Yamashitab, K., Formation of calcite thin films by cooperation of polyacrylic acid and self-generating electric field due to aligned dipoles of polarized substrates. *Journal of Colloid and Interface Science* **2009**, *330*, 374-379.
49. Criado, M.; Fernández-Jiménez, A.; Torre, A. G. d. I.; Aranda, M. A. G.; Palomo, A., An XRD study of the effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio on the alkali activation of fly ash. *Cement and Concrete Research* **2007**, *37*, 671-679.
50. Kojima, Y.; Kamei, S.; Toyama, T.; Nishimiya, N., Preparation of novel phosphor using intercalation of tobermorite. *Journal of Luminescence* **2009**, *12*(751-754).
51. Isu, N.; Ishida, H.; Mitsuda, T., Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (I) Tobermorite formation. *Cement and Concrete Research* **1995**, *25*, 243-248.
52. Wang, J.; Wu, X.-l.; Wang, J.-x.; Liu, C.-z.; Lai, Y.-m.; Hong, Z.-k.; Zheng, J.-p., Hydrothermal synthesis and characterization of alkali-activated slag-fly ash-metakaolin cementitious materials. *Microporous and Mesoporous Materials* **2012**, *155*, 186-191.
53. Paya, J.; Borrachero, M. V.; Monzo, J.; Soriano, L.; Tashima, M. M., A new geopolymeric binder from hydrated-carbonated cement. *Materials Letters* **2012**, *74*, 223-225.
54. Lee, D. S.; Lee, C. H.; Kim, J.; Yang, H. J., Geochemical characteristic of surface efflorescence on the seventh century stone pagoda in Republik of Korea. *Environ Geol* **2009**, *58*, 197-204.

55. Kani, E. N.; Allahverdi, A.; Lovis, J. L., Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cement & Concrete Composite* **2011**.
56. Chi, J.M., R. Huang, and C.C. Yang, *Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method*. Journal of Marine Science and Technology, 2002. **10**: p. 14-20.
57. Peter, M. A.; Muntean, A.; Meier, S. A.; Bohm, M., Competition of several carbonation reaction in concrete: A Parametric study. *Cement and Concrete Research* **2008**, *38*, 1385-1393.
58. Temuujin, J.; Riessen, A. v.; Williams, R., Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. *Journal of Hazardous Materials* **2009**, *167*, 82-88.
59. Temuujin, J.; Riessen, A. v., Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer. *J. Hazard. Mater.* **2009**, *164*, 634-639.
60. Dow, C.; Glasser, F. P., Calcium Carbonate efflorescence on Portland cement and building materials. *Cement and Concrete Research* **2003**, *33*, 147-154.
61. skvara, F.; Kopecky, L.; Myskova, L.; Smilauer, V.; Alberosvska, L.; Vinsova, L., Aluminosilicate polymers - Influence of Elevated Temperatures, Efflorescence. *Ceramic-silikaty* **2009**, *53* (4), 276-282.
62. Fernandez-Jimenez, A.; Garcia-Lodeiro; Palomo, A., Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials. *J Mater Sc* **2007**, *42*, 3055-3065.
63. Pacheco-Torgal; Abdollahnejad, Z.; Camoes, A. F.; Jamshidi, M.; Ding, Y., Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over portland cement or an unproven issue? *Construction and Building Materials* **2012**, *30*, 400-405.
64. Pernica, D.; Reis, P. N. B.; Ferreira, J. A. M.; Lauda, P., Effect of test conditions on the bending strength of a geopolymer-reinforced composite. *J Mater Sc* **2010**, *45*, 744-749.
65. Duxson, P.; Provis, J. L.; Lukey, G. C.; Deventer, J. S. J. v., The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research* **2007**, *37*, 1590-1597.
66. Polomo, A.; Fuente, J. I. L. d. l., Alkali-activate cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes Part I. Stabilisation of boron. *Cement and Concrete Research* **2003**, *33*, 281-288.
67. Rickard, W. D. A.; Williams, R.; Temuujin, J.; Riessen, A. v., Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications. *Materials Science and Engineering A* **2011**, *528*, 3390-3397.
68. Weng, L.; Sagoe-Crentsil, K., Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I—Low Si /Al ratio systems. *J Mater Sci* **2007**, *42*, 2997-3006.

69. Kong, D. L. Y.; Sanjayan, J. G.; Sagoe-Crentsil, K., Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research* **2007**, *37*, 1583-1589.
70. Katzer, J. R., Coal and Coal/Biomass-Based Power Generation. In *in Global Climate Change -The Technology Challenge*, Princiotta, F. T., Ed. Springer Springer+Business Media B.V. 2011: New York, 2011.
71. D., P.; P., G. I., Development of inorganic polymeric materials based on fired coal fly ash. *Acta Metallurgica Slovaca* **2006**, *12*, 321-327.
72. Chainpanich, A.; Nochaiya, T., Thermal analysis and microstructure of Portland cement-fly-ash-silica fume pastes. *J Therm Anal Calorim* **2010**, *99*, 487-493.
73. Boddy, A. M.; Hooton, R. D.; Thomas, M. D. A., The effect of the silica content of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* **2003**, *33*, 1263-1268.
74. Panagiotopoulou, C.; Kontori, E.; Perraki, T.; Kakali, G., Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media. *J Mater Sc* **2007**, *42*, 2967-2973.
75. Goni, S.; A., G.; P., L. M.; A., M., Activation of the fly ash pozzolanic reaction by hydrothermal conditions *Chemistry Concrete Research* **2003**, *39*, 1339-1405.

