



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**Optimasi Nilai Kuat Tekan Fleksural Geopolimer  
Abu Terbang Suralaya  
terhadap Variabel Alkali, Konsentrasi Alkali dan Suhu *Curing***

**SKRIPSI**

**Pebrida Nessya Arlis  
0906605460**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS INDONESIA  
DEPOK  
2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**Optimasi Nilai Kuat Tekan Fleksural Geopolimer  
Abu Terbang Suralaya  
terhadap Variabel Alkali, Konsentrasi Alkali dan Suhu *Curing***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana**

**Pebrida Nessya Arlis**

**0906605460**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPOK**

**2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Pebrida Nessya Arlis

NPM : 0906605460

Tanda Tangan : 

Tanggal : 12 Juli 2012




## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Pebrida Nessya Arlis  
NPM : 0906605460  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Optimasi Nilai Kuat Tekan Fleksural Geopolimer Abu Terbang Suralaya terhadap Variabel Alkali, Konsentrasi Alkali dan Suhu *Curing*

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dwi Marta Nurjaya S.T., M.T. (  )  
Penguji 1 : Dr. Ir. Sotya Astutiningsih M.Eng (  )  
Penguji 2 : Nofrijon Sofyan PhD (  )

Ditetapkan : Depok, Juli 2012

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur, penulis panjatkan kepada Allah SWT, yang tiada henti memberi rahmat dan petunjuk-Nya selama ini. Atas segala kemurahan-hatinya yang selalu mempermudah setiap kesulitan sang penulis dalam menyelesaikan studi ekstensi sekaligus penelitian skripsi ini. Sekali lagi, penulis sangat dan akan selalu berterima kasih atas kebahagiaan yang selalu dilimpahkan oleh Allah SWT. Dalam kehidupannya.

Ucapan terimakasih sepanjang hayat yang teramat dalam dan tak terungkapan, penulis tujukan untuk kedua orang tua tercinta, Ayah dan Ibu, yang selalu memberikan semangat baik secara mental, dukungan secara material, dan do'a tiada henti. Tidak lupa juga, kepada Uda Deri, penulis mengucapkan terimakasih atas perhatian dan nasihat-nasihat bijaknya.

Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada Bapak Dwi Marta Nurjaya S.T.,M.T., selaku pembimbing akademis dan sekaligus pembimbing penelitian skripsi ini. Terimakasih atas segala bimbingan, nasihat, serta pelajaran hidup yang beliau berikan selama ini, sehingga penulis memiliki pandangan dan wawasan baru mengenai berbagai hal. Terima kasih pula atas perhatian dan sikap kebabakan beliau saat membimbing penulis yang disertai dengan sikap penuh kesabaran.

Penulis menyadari terdapat berbagai pihak yang berkontribusi dalam memberikan dukungan, bantuan, serta bimbingan kepada penulis selama ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku Kepala Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
2. Ir. Ahmad Herman Yuwono, Phd, selaku Koordinator Mata Kuliah Spesial Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
3. Seluruh dosen Departemen Teknik Metalurgi dan Material, yang telah memberikan pengetahuan dan ilmunya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.

4. Seluruh karyawan Departemen Teknik Metalurgi dan Material yang telah menyempatkan waktunya untuk membantu hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
5. Mas Hari, mahasiswa S2, yang selalu dan sangat membantu dalam penyelesaian penelitian ini. Tidak lupa juga mengucapkan maaf atas kesalahan sengaja ataupun tidak disengaja selama ini.
6. Dedi Ferdian, mahasiswa ekst.2009, dan sekaligus teman seperjuangan dalam penyelesaian penelitian skripsi ini, yang selalu membantu dan sebagai teman *sharing* selama ini.
7. Mahasiswa seperjuangan, ekstensi metal 2009 yaitu Fiyus, Singgih, Mas Bud, Mas John, Shandi, Ibo, Bayu. Tidak lupa kepada Alfin, yang sudah mendahului 1 semester, dan menjadi '*trigger*' yang tajam.
8. Chelsea, kucingku tersayang, yang selalu menemani sang penulis mengerjakan skripsi, dan menjadi penghibur sejati penulis.

Semoga skripsi ini selalu dapat bermanfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan bagi mahasiswa dan masyarakat saat ini dan dikemudian hari.

**Penulis,**

2012

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

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

Nama : Pebrida Nessya Arlis  
NPM : 0906605460  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**OPTIMASI NILAI KUAT TEKAN FLEKSURAL GEOPOLIMER  
ABU TERBANG SURALAYA TERHADAP  
VARIABEL ALKALI, KONSENTRASI ALKALI DAN SUHU *CURING***

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada Tanggal : 12 Juli 2012

Yang menyatakan



(Pebrida Nessya Arlis)

## ABSTRAK

Nama : Pebrida Nessya Arlis  
NPM : 0906605460  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Optimasi NiLai Kuat Tekan Fleksural Geopolimer Abu  
Terbang Suralaya terhadap Variabel Alkali, Konsentrasi Alkali  
dan Suhu *Curing*.

Semen Portland telah diteliti mampu digantikan oleh abu terbang kelas F yang memiliki kandungan tinggi aluminium dan silika, sebagai bahan dasar pada beton. Rendahnya kandungan kalsium mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan asam. Semakin banyak kation penyeimbang muatan anion yang terbebaskan, akan meningkatkan kompleksitas geopolimerisasi. Pada studi ini diteliti bahwa penggunaan NaOH memiliki nilai kuat tekan fleksural yang lebih tinggi, dibandingkan dengan KOH yang dicampurkan dengan aktivator natrium silikat karena ukuran molekul kalium lebih besar dari natrium. Nilai kuat tekan fleksural mampu dioptimasi sebanyak 95.79%, dari 12.2987 MPa hingga 24,0796 MPa, pada penggunaan NaOH 12M dan *curing* 90<sup>0</sup>C. Peningkatan konsentrasi alkali akan mengakibatkan peningkatan alkalinitas seiring banyaknya OH<sup>-</sup> dan kation alkali, yang akan menyeimbangi muatannya melalui pemutusan pasangan anion. Baik kandungan H<sub>2</sub>O bebas maupun terperangkap, akan menguap membentuk pori ketika *curing* pada titik didihnya, yang mengakibatkan penurunan kekuatan.

Kata kunci : Geopolimer; alkali aktivasi; alumina silikat; beton ramah lingkungan.



## ***ABSTRACT***

Name : Pebrida Nessya Arlis  
NPM : 0906605460  
Major : Metallurgy and Material Engineering  
Final Project's title : The Optimization of Suralaya Fly Ash based Geopolymer's Flexural Strength through Alkali, Alkali Concentration and Temperature Curing Variables.

Portland cement was observedly able to be replaced with F-class fly ash containing high aluminium and silica, as a raw material for concrete, since its manufacturing produces emission gas of CO<sub>2</sub>. The low calcium containing of fly ash can be increasing the high acidic environment resistance. The more charge balancing cation released as the fly ash mineral dissolution, the more complex its geopolymerization mechanism. In this study, was shown that NaOH gave higher flexural strength than KOH mixed with sodium silicate activator since sodium has a smaller molecule size than potassium does. Formulation of NaOH 12M using and 90<sup>0</sup>C *Curing*, The flexural strength point optimizedly increase 95.79% reaching out 24,0796 MPa from 12,2987 MPa. The increasing of alkali concentration gives too high alkalinity representatively present excess OH<sup>-</sup> and its alkali cation, balancing their charge through anion pairing detachment. It's either free H<sub>2</sub>O or trapped H<sub>2</sub>O could be evaporating leaving pores over its boiling point temperature in curing, and consequently gives strength decreasing.

Keywords : *Geopolymer; activated alkali concrete; alumino silicate; green concrete*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK .....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR RUMUS .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
1.5. Batasan Masalah.....	4
1.6. Sistematika Penulisan.....	5
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1. Geopolimerisasi.....	7
2.2. Abu Terbang ( <i>Fly Ash</i> ) .....	10
2.3. Alkali Aktivator .....	15
2.4. Geopolimerisasi.....	17
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>21</b>
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	22
3.2. Peralatan dan Bahan.....	23
3.2.1. Alat.....	23

3.2.2. Bahan.....	28
3.3 Metoda Perhitungan.....	30
3.4 Prosedur pembuatan sampel.....	32
3.5 Proses Uji Karakterisasi.....	33
3.5.1 Uji kuat tekan fleksural.....	33
3.5.2. Uji X-Ray Flouresence (XRF).....	35
3.5.3. Uji X-Ray Diffraction (XRD).....	36
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>37</b>
4.1 Optimasi variabel alkali.....	37
4.2 Optimasi suhu <i>curing</i> .....	48
4.3 Optimasi konsentrasi alkali.....	51
<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>54</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>55</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>58</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Tipe struktur poly(sialate).....	9
<b>Gambar 2.2</b> Perbandingan Si/Al terhadap aplikasi teknologi .....	10
<b>Gambar 2.3</b> Perbedaan reaksi pada semen Portland dan geopolimer.....	17
<b>Gambar 2.4</b> Skematis proses pembentuka geopolimer.....	18
<b>Gambar 2.5</b> Hubungan suhu pemanasan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ terhadap pembentukan mineral.....	20
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir proses penelitian.....	22
<b>Gambar 3.2</b> Alat timbang digital .....	23
<b>Gambar 3.3</b> Perakatan gelas dan aquabides.....	24
<b>Gambar 3.4</b> Cetakan logam dimensi 1cm x 1cm x 8cm.....	24
<b>Gambar 3.5</b> <i>Mixer</i> .....	25
<b>Gambar 3.6</b> <i>Furnace</i> .....	26
<b>Gambar 3.7</b> X-Ray Diffraction (XRD) .....	26
<b>Gambar 3.8</b> Mesin uji kuat tekan fleksural .....	27
<b>Gambar 3.9</b> Abu terbang kelas F.....	28
<b>Gambar 3.10</b> <i>Waterglass</i> .....	28
<b>Gambar 3.11</b> Kalium hidroksida .....	29
<b>Gambar 3.12</b> Natrium hidroksida .....	29
<b>Gambar 3.13</b> Skematis pengujian kuat tekan fleksural .....	34
<b>Gambar 3.14</b> Skematis pembentukan defleksi .....	34
<b>Gambar 3.15</b> Skematis interaksi X-Ray dan elektron pada XRF.....	35
<b>Gambar 3.16</b> Skematis interaksi X-Ray dan elektron pada XRD .....	36
<b>Gambar 4.1</b> Grafik hasil uji kuat tekan fleksural terhadap variabel alkali pada <i>curing</i> $80^\circ\text{C}$ .....	38
<b>Gambar 4.2</b> Grafik pengaruh variabel alkali pada konsentrasi sama terhadap kuat tekan fleksural .....	39
<b>Gambar 4.3</b> Isomorf struktur monomer poly(sialate) .....	40
<b>Gambar 4.4</b> Isomorf struktur pada pasangan kation.....	41

<b>Gambar 4.5</b> Hasil uji XRD pasta geopolimer variabel alkali.....	40
<b>Gambar 4.6</b> Grafik pengaruh suhu curing terhadap kuat tekan fleksural pasta geopolimer .....	48
<b>Gambar 4.7</b> Ilustrasi H <sub>2</sub> O terperangkap pada struktur mineral .....	50
<b>Gambar 4.8</b> Grafik pengaruh konsentrasi alkali terhadap nilai kuat tekan pasta geopolimer.....	51



## DAFTAR TABEL

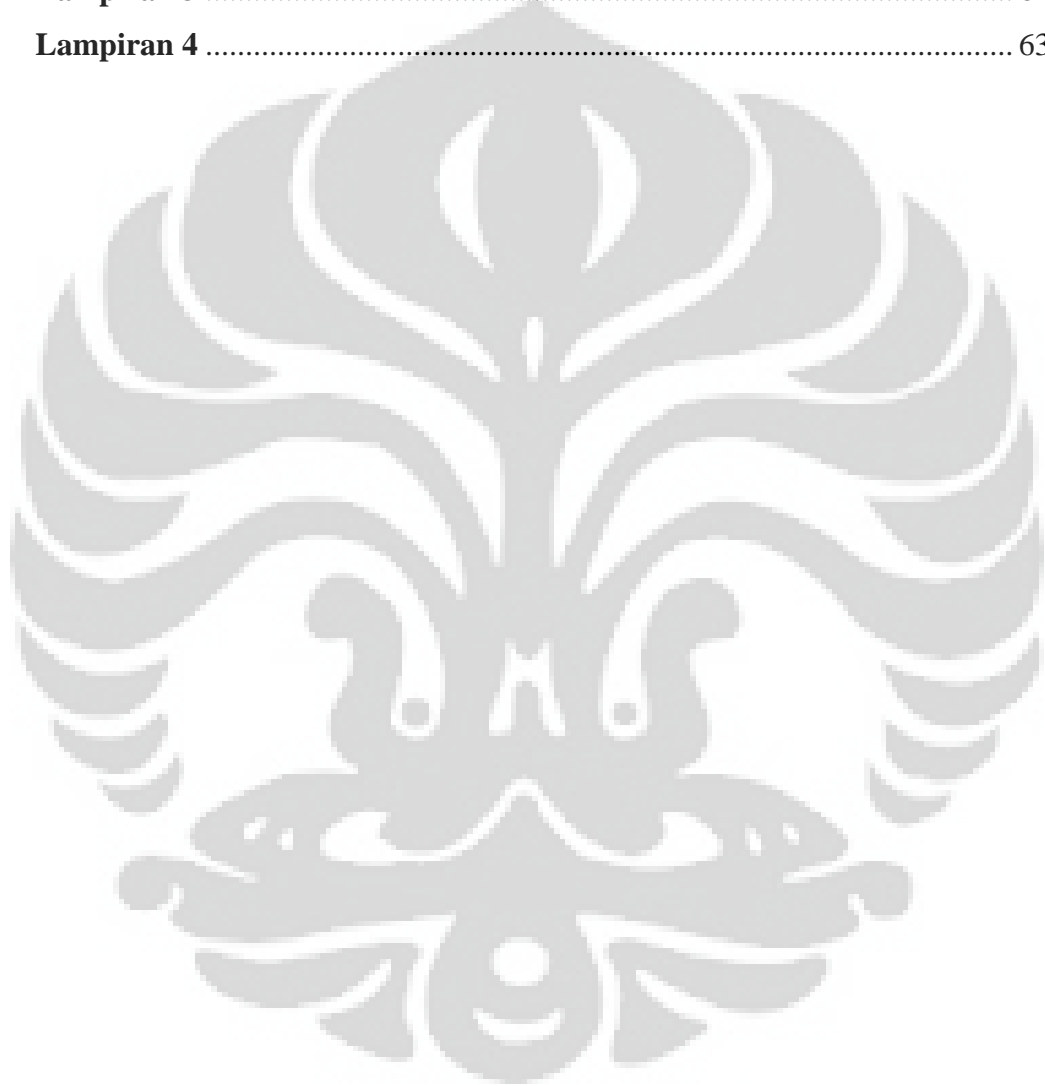
<b>Tabel 2.1</b> Kode limbah padat B3 .....	12
<b>Tabel 2.2</b> Kandungan mineral umum pada abu terbang.....	12
<b>Tabel 2.3</b> Kandungan unsur berdasarkan jenis abu batubara .....	13
<b>Tabel 2.4</b> Klasifikasi abu terbang berdasarkan ASTM C618.....	14
<b>Tabel 3.1</b> Data hasil uji XRF .....	30
<b>Tabel 3.2</b> Hasil perhitungan rasio silica terhadap aluminium .....	31
<b>Tabel 3.3</b> Komposisi pada variabel sampel pasta geopolimer .....	32
<b>Tabel 4.1</b> Perhitungan mol alkali pada konsentrasi yang sama.....	39
<b>Tabel 4.2</b> Hasil analisa mineral hasil uji XRD .....	44
<b>Tabel 4.3</b> Perhitungan rasio mol $M_2O/SiO_2$ .....	52

## DAFTAR RUMUS

<b>Rumus 2.1</b> Dekarbonisasi <i>lime</i> pada pembuatan klinker .....	7
<b>Rumus 2.2</b> Rumus empiris geopolimer aluminosilikat .....	8
<b>Rumus 2.3</b> Pembentukan prekursor dan rantai induk geopolimer .....	15
<b>Rumus 2.4 – 2.7</b> Pembentukan monomer silikat.....	18
<b>Rumus 2.8</b> Pembentukan aluminat.....	19
<b>Rumus 2.9 – 2.13</b> Pembentukan oligomer silikat .....	19
<b>Rumus 3.1</b> Perhitungan kuat tekan fleksural.....	33
<b>Rumus 3.2 – 3.3</b> Persamaan panjang gelombang terhadap sudut pada XRD .....	36
<b>Rumus 4.1</b> Pembentukan endapan besi oksida.....	42
<b>Rumus 4.2– 4.3</b> Pembentukan tetravalent-Al .....	42
<b>Rumus 4.4 – 4.5</b> Pembentukan endapan pada Mn .....	42
<b>Rumus 4.6</b> Ionisasi <i>waterglass</i> .....	46
<b>Rumus 4.7</b> Pembentukan monomer silikat.....	46
<b>Rumus 4.8</b> Skematis reaksi pelarutan aluminium .....	47
<b>Rumus 4.9-4.10</b> Pembentukan $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	47
<b>Rumus 4.11-4.12</b> Pembentukan $\text{CaCO}_3$ .....	47
<b>Rumus 4.13</b> Reaksi polikondensasi aluminasilikat.....	50
<b>Rumus 4.14</b> Pembentukan $\text{Si}(\text{OH})_4$ .....	52
<b>Rumus 4.15</b> Pembentukan $\text{Al}(\text{OH})_3$ .....	52
<b>Rumus 4.16</b> Pemutusan rantai ikatan aluminosilikat.....	53

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1</b> .....	59
<b>Lampiran 2</b> .....	60
<b>Lampiran 3</b> .....	61
<b>Lampiran 4</b> .....	63





# BAB I . PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan beton di dunia sebagai material struktural pada tingginya tingkat pembangunan seperti gedung, jembatan *monorail*, monumen dan lainnya, mensyaratkan kekuatan yang tinggi pula. Inovasi dan penelitian peningkatan kekuatan sudah dilakukan untuk menciptakan *High-performance Concrete* (HPC), yang tidak pula mengabaikan durabilitas jangka panjang, tahan terhadap lingkungan korosif, dan defleksi dari keuletan, mulai dari komposit hingga geopolimer.

Beton itu sendiri merupakan campuran yang memiliki bahan dasar semen, air, kerikil dan pasir. Banyaknya aplikasi semen ini, membuat para pengusaha industri mengembangkan berbagai macam semen dan yang paling umum digunakan pada pembuatan infrastruktur yaitu semen Portland. Semen ini merupakan semen hidrolisis hasil penghalusan dari klinker yang memiliki kandungan utama silika, kapur dan alumina, yang dicampur pada suhu 1550<sup>0</sup>C<sup>[1]</sup>. Walaupun biaya pemeliharaannya cukup kecil dan hal ini menguntungkan dari segi ekonomi tapi hal lain yang timbul dan merugikan yaitu produksi CO<sub>2</sub> tinggi yang menjadi isu utamanya.

Bahan kimia tambahan dan material semen semakin marak dikembangkan pada era kini, salah satunya material geopolimer. Geopolimer merupakan mineral polimer hasil dari geosintesis atau geokimia<sup>[2]</sup>. Material aluminasilikat yang menjadi komponen utama pada material geopolimer ini bisa berasal dari mineral alami atau hasil produk seperti abu terbang.

Produksi batubara di Indonesia diperkirakan pada tahun 2010 yaitu 153 juta ton dimana 108 juta ton untuk pemakaian sendiri dan sisanya untuk di ekspor<sup>[3]</sup>. Dari pembakaran batubara itu sendiri dihasilkan sekitar 5% polutan padat abu batubara dimana 10-20% merupakan jenis *bottom ash* dan 80-90% merupakan jenis abu terbang. Perkembangan pesat pertambangan batubara didukung pula oleh kebijakan dan peraturan pemerintah seperti UU No.1/1967 tentang

penanamann modal asing dan juga UU No.11/1967 tentang ketentuan-ketentuan pokok pertambangan<sup>[3]</sup>.

Semangat dari pasal 33 UUD 1945 tentang segala isi bumi di Indonesia perlu dimanfaatkan secara optimal untuk kesejahteraan rakyat, membuat para peneliti tertarik untuk mengeksplorasi pemanfaatan terhadap limbah padat abu batubara. ASTM mengklasifikasikan kelas C dengan kandungan kalsium lebih dari 20% dan kelas F dengan kandungan kalsium kurang dari 20%.

Aluminasilikat mineral mampu diaktivasi oleh campuran alkali aktivator. Pada umumnya, alkali aktivator merupakan campuran larutan alkali dan *soluble silicate*. Natrium atau kalium merupakan alkali yang umum digunakan dan sangat baik menstabilkan anion momoner aluminasilikat. Penelitian-penelitian sebelumnya sangat umum menggunakan campuran natrium hidroksida dengan natrium silikat atau kalium hidroksida dengan kalium silikat. Aktivasi oleh kalium, ditemukan mampu memiliki nilai kekuatan yang lebih tinggi dibanding oleh aktivasi natrium.

Optimasi pencapaian nilai kuat tekan geopolimer selain dari faktor penggunaan alkali, sangat dipengaruhi oleh konsentrasi alkali itu sendiri. Penggunaan larutan alkali mampu mencapai titik nilai kekuatan optimum pada konsentrasi tertentu seiring dengan naiknya alkalinitas (pH).

Selain itu, suhu pada proses *curing* mampu menjadi katalis dalam geopolimerisasi. Dengan prinsip yang sama yaitu, geopolimerisasi mampu mencapai nilai kuat tekan optimum pada suhu *curing* tertentu.

Dengan prinsip umum pada penjelasan sebelumnya, diharapkan penelitian ini mampu membentuk nilai kekuatan optimum pada variabel alkali, konsentrasi alkali dan suhu *curing*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Semen Portland, yang menjadi bahan utama pembuatan beton, memiliki isu lingkungan dimana terjadi pembentukan emisi gas rumah kaca CO<sub>2</sub> yang sama banyaknya dengan jumlah *calcite* (dari *lime*) bahan baku pembuatan semen portland itu sendiri. Selain itu, selama bertahun-tahun telah ditemukan banyak terjadinya kerusakan beton akibat lingkungan korosif<sup>[4]</sup>, dimana akan semakin

progresif kerusakan beton bila *reinforcement* sudah terkorosi. Perbaikan yang dilakukan pada beton *reinforcement* ini, ada 2 cara yaitu menghentikan korosi lanjutan atau mengurangi absorpsi ion korosif (klorida, sulfat) ke dalam beton.

Selain permasalahan terhadap isu yang ditimbulkan oleh beton berbahan dasar semen portland, isu kekuatan (kuat tekan silinder dan kuat tekan fleksural) merupakan hal yang paling penting dari beton ini. Berbagai macam konstruksi mensyaratkan material struktural yang lebih kuat dibanding beton konvensional seperti *high-performance Concrete* (HPC). Nawy menyebutkan bahwa HPC merupakan beton yang dirancang untuk lebih tahan lama dan lebih kuat dibanding beton konvensional<sup>[5]</sup>. *American Concrete Institute* (ACI) mendefinisikan beton dengan kekuatan normal memiliki kuat kompresif silinder tidak lebih dari 6000 psi (42 Mpa) dimana kekuatannya melebihi dikategorikan sebagai beton dengan kekuatan tinggi<sup>[5]</sup>.

Inovasi pada formulasi geopolimer abu terbang, telah banyak dilakukan untuk mencari kekuatan yang mampu menggantikan beton konvensional. Pada penelitian ini, dilakukan formulasi terhadap beberapa variabel hingga mampu mendapatkan nilai optimum signifikan pada nilai kuat tekan fleksuralnya. Optimasi pertama yang dilakukan yaitu geopolimerisasi pada penggunaan variabel alkali natrium, kalium, dan campuran keduanya, dengan penggunaan *soluble silicate* yang sama yaitu natrium silikat (*waterglass*).

Perbedaan sifat dan perilaku alkali pada pelarutan aluminasilikat adalah hal yang mendasar, yang akan menentukan pembentukan amorfus geopolimer. Suhu yang merupakan katalis reaksi kimia, dijadikan variabel pada *curing* sistem geopolimer pada optimasi kedua. Optimasi ketiga, dilakukan pada variabel konsentrasi, dimana reaksi optimum dipengaruhi oleh rasio  $M_2O$  (alkali)/ $SiO_2$ . Selain itu, hal krusial lain yaitu tingkat alkalinitas sistem geopolimer seiring kenaikan konsentrasi, yang akan mempengaruhi reaksi kimia. Dengan begitu, maka akan didapatkan hasil nilai kekuatan optimum pada formulasi dari tiga variabel pada sistem geopolimer abu terbang Suralaya pada penelitian ini.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian tugas akhir dengan judul “Optimasi Kuat Tekan fleksural Geopolimer Abu Terbang Suralaya terhadap Vaariabel Alkali, Konsentrasi Alkali dan Suhu *Curing*”, memiliki tujuan penelitian sebagai berikut :

1. Mampu membuat pasta geopolimer dari material anorganik abu terbang kelas F.
2. Mengetahui perbedaan kuat tekan ffileksural geopolimer pada formulasi alkali activator NaOH dengan *waterglass*, KOH dengan *waterglass* , dan campuran KOH-NaOH dengan *waterglass*.
3. Membuat dan menginvestigasi geopolimer abu terbang kelas F dengan nilai kuat tekan fleksural optimum pada variabel alkali, suhu *curing* dan konsentrasi alkali.

### 1.4 Manfaat penelitian

Dengan dilakukan penelitian ini, diharapkan mampu membentuk beton geopolimer yang aplikatif pada konstruksi dan mampu saing terhadap beton dengan bahan dasar semen portland, baik yang konvensional maupun HPC. Dengan begitu, aplikasi penelitian ini mampu menjadi material yang ramah lingkungan tanpa menghasilkan emisi. Satu hal penting lainnya, aplikasi penelitian ini mampu mengurangi konsumsi energi tinggi yang terjadi pada pembuatan semen portland. Dengan adanya penelitian ini, limbah abu abutabara bisa dimanfaatkan dibanding dibuang ke *landfill*, dan penghematan terhadap biaya pembersihannya.

Hasil penelitian ini, selain diharapkan mampu aplikatif, tetapi juga mampu menjadi referensi teori untuk penelitian terhadap pengembangan pembuatan geopolimer berikutnya.

### 1.5 Batasan Penelitian

Pembatasan masalah dilakukan untuk memudahkan pembahasan pokok permasalahan secara jelas dan sistematis. Pada penelitian ini penulis membatasi masalah pengaruh variabel penggunaan KOH sebagai alkali aktivator, konsentrasi

optimum, dan suhu *curing* pada geopolimer berbahan dasar abu terbang ASTM C618 kelas F, terhadap kuat tekan fleksuralnya.

Pada penelitian ini, digunakan abu terbang yang berasal dari PLTU Suralaya, dengan spesifikasi kelas F dimana memiliki unsur silika dan aluminium yang tinggi tetapi unsur kalsium rendah. Polimerisasi menggunakan aktivator alkali berupa NaOH atau KOH berupa pellet, dan natrium silikat (*waterglass*) jenis PA (*Pure Analysis*). Pasta geopolimer ini menggunakan aquades di Departemen Metalurgi dan Material UI. Klasifikasi ASTM C618 pada abu terbang ditunjang oleh data pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF). Untuk mengetahui hubungan kuat tekan fleksural terhadap kristalinitas mineral yang terbentuk dilakukan pengujian kuat tekan fleksural dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Selain itu proses *curing* geopolimer ini dilakukan di dalam *furnace*.

#### **1.6. Sistematika Penulisan**

Dalam penulisan ini, sistematika penulisan disusun agar konsep dalam penulisan skripsi menjadi berurutan sehingga pembaca dapat memahami alur penelitian dan sistematika dari penulisan skripsi penelitian ini. Sistematika tersebut dapat diartikan dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan. Bab-bab tersebut diantaranya :

##### **a) Bab 1 Pendahuluan**

Membahas mengenai latar belakang penulisan, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

##### **b) Bab 2 Tinjauan Pustaka**

Membahas tentang teori dasar dari pembentukan beton dan masalah yang ditimbulkan. Selain itu, membahas tentang konsep kandungan alumino silikat pada abu terbang, yang mampu menggantikan beton melalui geopolimerisasi. Konsep mekanisme yang dipengaruhi oleh faktor-faktor penting, seperti pelarutan, rasio mol, konsep polikondensasi geopolimer, mampu dipahami terhadap sistematika geopolimerisasi.

**c) Bab 3 Metodologi Penelitian**

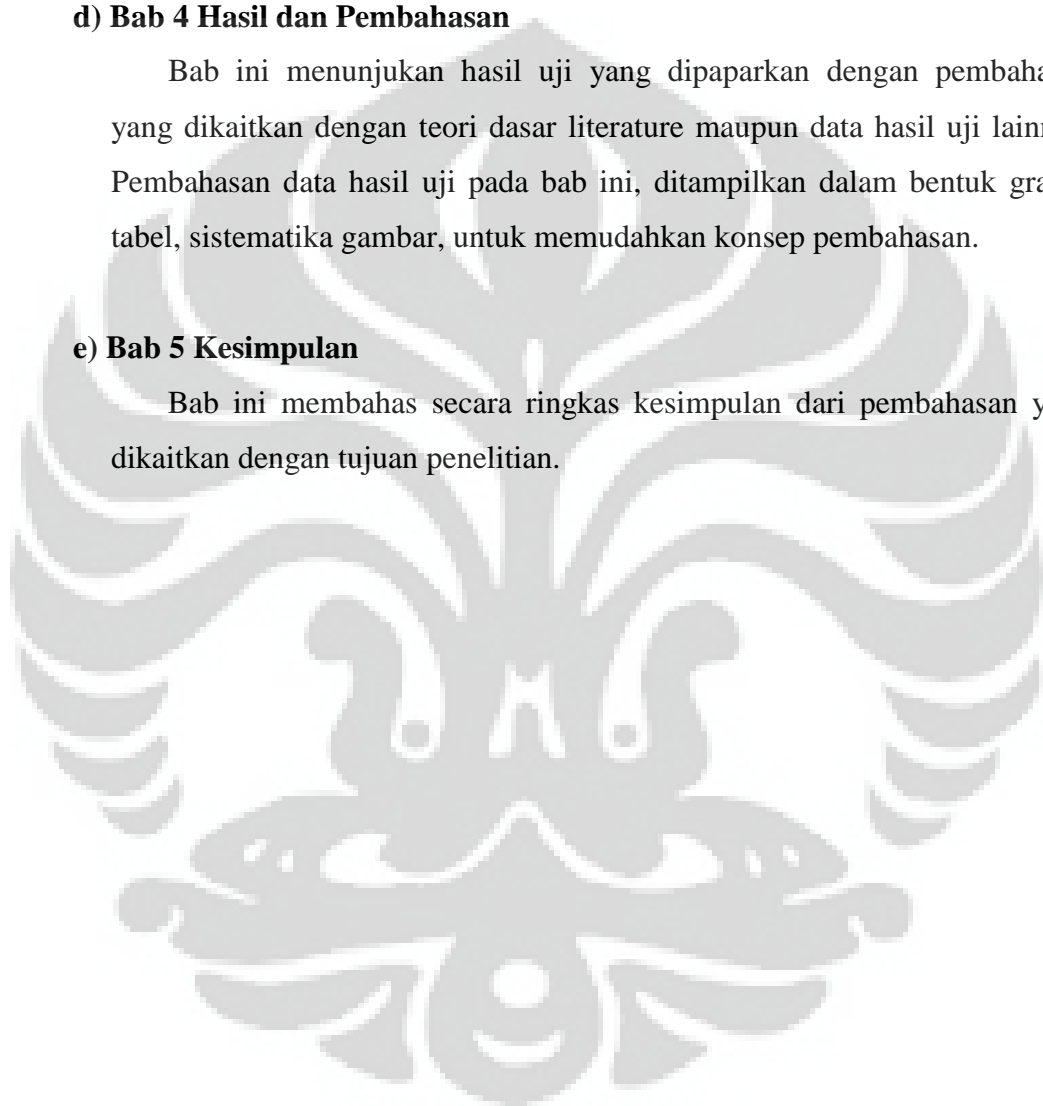
Bab ini membahas mengenai diagram alir proses kerja penelitian, alat dan bahan yang digunakan untuk penelitian. Selain itu, bab ini menjelaskan tentang konsep perhitungan mol rasio yang ditetapkan pada geopolimer. Pemahaman konsep pengujian (alat uji), dijelaskan juga pada bab ini.

**d) Bab 4 Hasil dan Pembahasan**

Bab ini menunjukkan hasil uji yang dipaparkan dengan pembahasan yang dikaitkan dengan teori dasar literature maupun data hasil uji lainnya. Pembahasan data hasil uji pada bab ini, ditampilkan dalam bentuk grafik, tabel, sistematika gambar, untuk memudahkan konsep pembahasan.

**e) Bab 5 Kesimpulan**

Bab ini membahas secara ringkas kesimpulan dari pembahasan yang dikaitkan dengan tujuan penelitian.



## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Geopolimer

Geopolimer merupakan bahan atau mineral yang berupa anorganik yang disintesa melalui proses polimerisasi. Unsur-unsur anorganik yang memiliki kristal struktur ini akan diubah bentuk amorphus seperti karakter polimer. Dengan demikian, geopolimer memiliki struktur mineral amorfus hingga semi kristalin. Davidovits yang memiliki studi khusus pada kimia polimer organik, mengamati banyaknya terjadi kebakaran secara tiba-tiba pada material organik plastik yang kemudian dikembangkan material polimer plastik *nonflammable* dan *noncombustable* [6]. Hal ini memicu pengembangan polimer berbahan mineral atau anorganik, dimana ditemukan awalnya bahwa mineral *feldspathoids* dan zeolit mampu bereaksi secara hidrotermal sama baik dengan plastik organik dalam keadaan basa.

Isu lain yang menjadi alasan utama pengembangan geopolimer sebagai material beton untuk infrastruktur yaitu pembentukan gas rumah kaca CO<sub>2</sub> hasil reaksi pada semen Portland. Davidovits yang pada penelitiannya di tahun 1990 di PennState University, menyebutkan bahwa produksi gas dari 1 ton material geopolimer kaolin lebih kecil hingga 6 kali yaitu sebanyak 0,180 ton CO<sub>2</sub>, dimana pada 1 ton semen portland akan menghasilkan 1 ton gas CO<sub>2</sub> [2]. Dibawah ini merupakan reaksi kimia dekarbonisasi dari *lime* pada pembuatan klinker semen [7].



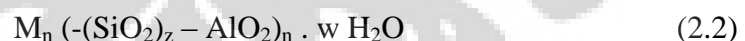
Pada beton berbasis sement portland ini, gas rumah kaca dihasilkan ketika proses pembuatan semen. Semen ini tersusun dari 3 jenis komposisi yaitu *carcareous*, *argillocarcareous*, dan *argillaceous*. Secara mudahnya, kandungan tersebut dikenal sebagai kapur, silika dan alumina. Ketiga bahan tersebut kemudian dicampur dan dibakar pada suhu 1550<sup>0</sup>C [1], lalu dibentuk serbuk ketika

dingin. Di bawah ini merupakan reaksi yang terjadi pada proses pembuatan klinker seiring peningkatan suhu <sup>[7]</sup>.

- ~500 – 800<sup>0</sup>C , terjadi dekomposisi mineral *clay*
- ~700 – 900<sup>0</sup>C, terjadi dekomposisi *calcite* (berasal dari *lime*)
- ~1000 – 1300<sup>0</sup>C, terjadi pembentukan 2CaO.SiO<sub>2</sub>, hasil reaksi dari *calcite*, SiO<sub>2</sub> dan *clay* yang terdekomposisi
- ~1300 – 1450<sup>0</sup>C, terjadi pembentukan 3CaO.SiO<sub>2</sub>, hasil reaksi dari 2CaO.SiO<sub>2</sub> dan CaO dengan bantuan flux hasil lelehan aluminat dan *ferrite*.

Pada semen Portland ini, biasanya ditambahkan sekitar 2-4% gipsum sebagai bahan pengikat. Kekerasan beton maksimal ketika pengerjaan terhadap 28 hari proses, sehingga bila terjadi pengujian sebelum hari ke-28, maka perlu dikalikan suatu faktor konstanta. Dengan kata lain, pembuatan beton dengan menggunakan semen Portland akan mengkonsumsi biaya tinggi dibandingkan dengan penggunaan abu terbang batu bara. Selain pemanfaatan limbah, kandungan aluminosilikat pada abu terbang ini, hanya perlu diaktivasi oleh alkali dengan suhu dan waktu curing yang relatif tidak mengkonsumsi energi tinggi.

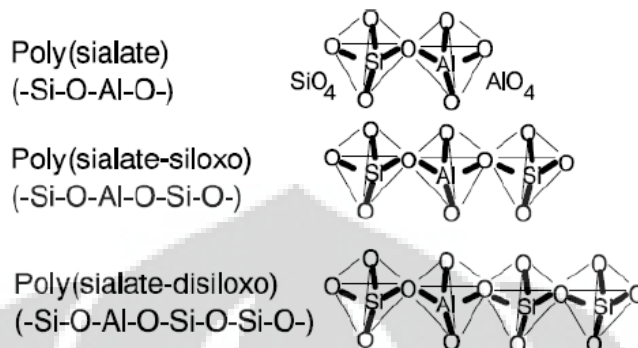
Geopolimer bisa dibentuk oleh berbagai unsur mineral, dimana salah satunya yaitu Si dan Al, yang biasa dikenal dengan istilah 'poli(sialate)'. Sialat merupakan kependekan dari silika-okso-aluminat. Rumus empiris dari poly(sialate) yaitu:



Dimana 'M' adalah kation monovalen seperti kalium atau natrium, 'n' merupakan derajat polikondensasi, dan 'z' merupakan suatu bilangan sebagai jumlah atau banyak. Kekuatan baik dibangun oleh interaksi-interaksi elektron pada atom Si, Al dan O. Kekuatan ikatan terbaik terjadi pada Si-O-Si dibanding dengan Si-O-Al atau Al-O-Al. Oleh sebab itu, kekuatan geopolimer ini dipengaruhi oleh rasio unsur Si, Na, Al, K, kandungan air, untuk membentuk kekuatan geopolimer yang optimum. Selain itu, Kesempurnaan dari polimerisasi sedemikian hingga membentuk struktur dengan sifat mekanik, kima, atau fisika tertentu, tergantung dari proses aktivasi dan juga derajat polimerisasinya.



Poly(sialate) ini dibagi menjadi 3 tipe yaitu tipe poly(sialate), tipe poly(sialate-siloxo) dan tipe poly(sialate-disiloxo). Gambar struktur poly(sialate) dapat dilihat di bawah ini.



Gambar 2.1 Tipe struktur poly(sialate) <sup>[2]</sup>

Davodovits juga menyebutkan bahwa material geopolimer yang berasal dari unsur anorganik ini, bisa diperoleh dari beberapa sumber limbah material, seperti di bawah ini <sup>[2]</sup>.

1. 'Tailing' tambang berbasis *muscovite*

Analisa mineralogi mengindikasikan bahwa limbah lumpur memiliki komposisi utama *muscovite*,  $Kal_2(Si_3AlO_{10})(OH)_4$ , dan *quartz* dengan kandungan tinggi besi dan logam alkali. Suhu dehidroksilasi *muscovite* lebih tinggi dari *kaolinite*, yaitu 900-950<sup>0</sup>C. Kekuatan tertinggi, 40 Mpa pada 28 hari, didapatkan dengan kalsinasi serbuk *muscovite* pada suhu 950<sup>0</sup>C selama 2 jam. penggunaan suhu di bawah 850<sup>0</sup>C, tidak mampu membentuk geopolimer alumino-silikat yang baik.

2. Limbah *kaolinitic-shale*

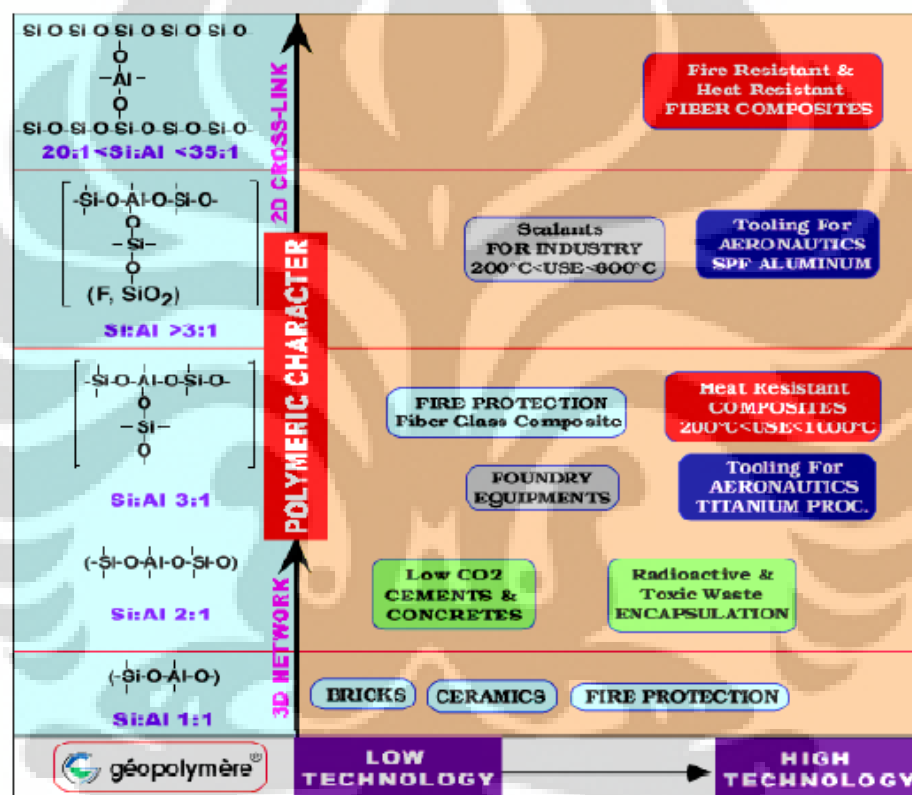
Geopolimer dari bahan ini mampu membentuk 3-4 rasio molar Si:Al. Pencampurannya dengan pasir sebagai bahan pengisi, mampu membentuk semen geopolimer dengan kekuatan kompresif hingga 100 Mpa dan kekuatan fleksural hingga 15 MPa, walaupun sudah mengalami imersi oleh air setelah *curing*.

3. 'Tailing' tambang limbah batubara

Pada lapisan bumi, urat batubara sangat sering ditemukan berada diantara lapisan geologi granit kaolinitik. Hal ini mampu mengubah kaolinite menjadi

oksida alumino-silika ketika batubara dibakar. Lapisan natural ini banyak ditemuka di daerah sekitar Australia dan Czech. Dengan kata lain, geopolimerisasi dengan bahan baku ini tidak membutuhkan kalasinasi sehingga mampu menghemat energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca  $\text{CO}_2$ .

Di bawah ini merupakan pemanfaatan mineral alumino-silikat berdasarkan rasio Al:Si, dan berdasarkan teknologi.



Gambar 2.2 Perbandingan Si:Al terhadap aplikasi teknologi <sup>[8]</sup>.

## 2.2 Abu Terbang (*Fly Ash*)

Abu terbang merupakan limbah hasil pembakaran dari batubara. Muchidin mendefinisikan abu terban batubara sebagai zat organik yang tertinggal setelah sampel batu bara dibakar (*inceneration*) dalam kondisi standar sampai diperoleh berat yang tetap <sup>[9]</sup>. Selain itu disebutkan juga bahwa dalam pembakaran batubara terjadi penguapan air konstitusi dari lempung, karbon dioksida dari karbonat,

teroksidasinya pirit menjadi besi oksida, serta terjadinya fiksasi belerang oksida. Mekanisme pembakaran yang terjadi pada batubara yaitu pertama, penguapan moisture pada suhu  $100^{\circ}\text{C}$ . kemudian terjadi pelepasan karbon dioksida dari karbonat, dan oksidasi besi sulfida menjadi besi oksida, pada sekitar suhu  $500^{\circ}\text{C}$ . oksida oksida-sulfur tertambat pada suhu yang lebih tinggi dari  $800^{\circ}\text{C}$ .

Abu batubara tersebar menjadi *bottom ash* tungku pembakaran yang terbentuk menjadi klinker di dalam tungku pembakaran, dan terlalu berat untuk dibawa oleh gas yang panas melalui ketel uap. Abu batubara jenis ini jatuh ke bagian bawah dari tungku pembakaran. Sisa abu batubara yang terbawa gas disebut dengan abu terbang (*fly ash*). Abu terbang ini akan menimbulkan beberapa masalah<sup>[9]</sup>, seperti:

- Mampu mengenai dan menusuk permukaan pemindahan panas. Hal ini menyebabkan pengendapan abu terbang dan memperlambat reaksi berikutnya.
- Mampu mengikis tabung ketel uap dengan cara menyimpannya.
- Merupakan material pencemar udara.

Ketika abu terbang berada dalam *boiler*, dan menjadikannya bersifat plastis dan lengket. Bila keadaan ini kontak dengan permukaan yang lebih dingin seperti tabung ketel uap, maka akan terbentuk terak (*slag*) pada permukaan tabung tersebut dan mengakibatkan turunya kecepatan pemindahan panas (*heat transfer*), menghalangi aliran gas melalui *boiler-passes*, dan menimbulkan persoalan pemeliharaan.

Hal-hal tersebut merupakan hal yang menjadi alasan mengapa abu terbang pada pemanfaatan batubara menjadi limbah dan tidak disukai. Selain itu, Wardani mencantumkan tentang pasal yang berkaitan dengan hal ini, yang tertuang pada Pasal 7 Ayat 2 menyebutkan bahwa daftar limbah dengan kode limbah D220, D221, D222 dan D223 dapat dinyatakan sebagai limbah B3 setelah dilakukan uji *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) dan atau uji karakteristik. Dalam daftar limbah B3 dari sumber yang spesifik, abu terbang dengan kode limbah D223 adalah sebagai berikut pada table di bawah ini<sup>[3]</sup>.

Tabel 2.1 Kode limbah padat B3 <sup>[3]</sup>

Kode limbah	Jenis Industri / kegiatan	Kode Kegiatan	Sumber Pencemaran	Asal / Uraian Limbah	Pencemaran Utama
D223	PLTU yang menggunakan bahan bakar batubara	4010	* Pembakaran Batubara yang digunakan untuk Pembangkit Listrik	*Fly ash *Bottom Ash (yang memiliki kontaminan di atas standar dan memiliki karakteristik limbah B3) *Limbah	*Logam berat *Bahan Organik (PNA-Polynuclear aromatics)

Sifat-sifat abu terbang di dalam tungku pembakaran sangat tergantung pada reaksi antara mineral-mineral pembentuk abu terbang ini. Kandungan pada abu terbang sangat dipengaruhi oleh dimensi keseluruhan ketel uap dan dari ukuran serta penempatan berbagai permukaan panas. Abu terbang yang berasal dari jenis batubara rendah, umumnya tahan terhadap *slagging*, kecuali untuk yang mengandung alkali (natrium) tinggi.

Dengan meningkatnya kandungan kalsium dan natrium, kecepatan pergerakan pada tabung akan naik karena adanya ikatan antara partikel kalsium silikat dengan senyawa natrium. Kandungan natrium oksida khususnya mempunyai suatu pengaruh sinergis pada kecepatan pergerakan, menaikkan kekuatan pengukatan, dan membuat endapan menjadi lebih sukar dihilangkan <sup>[8]</sup>. Dibawah ini merupakan tabel kandungan mineral umumnya pada abu terbang.

Tabel 2.2 Kandungan mineral umum pada abu terbang <sup>[2]</sup>

Grup	Mineral	Formula	Specific Gravity
Clay	<i>Kaolinite</i>	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$	2.60
	<i>Illite</i>	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	2.90
	<i>Monmorillonite</i>	$Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2$	2.30

Tabel 2.2 Kandungan mineral umum pada abu terbang <sup>[2]</sup> (lanjutan)

<b>Grup</b>	<b>Mineral</b>	<b>Formula</b>	<b>Specific Gravity</b>
<i>Carbonates</i>	<i>Siderite</i>	FeCO <sub>3</sub>	3.96
	<i>Calcite</i>	CaCO <sub>3</sub>	2.94
	<i>Dolomite</i>	Ca(CO <sub>3</sub> ).Mg(CO <sub>3</sub> )	2.86
<i>Sulfides</i>	<i>Pyrite</i>	FeS <sub>2</sub>	5.01
	<i>Marcasite</i>	FeS <sub>2</sub>	4.88
<i>Accessory Minerals</i>	<i>Quartz</i>	SiO <sub>2</sub>	2.65
	<i>Hematite</i>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.26
	<i>Biotite</i>	K <sub>2</sub> O.MgO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	
	<i>Rutile</i>	TiO <sub>2</sub>	
	<i>Orthoclase (Feldspars)</i>	K <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .6SiO <sub>2</sub>	2.63
	<i>Albite (Feldspars)</i>	Na <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .6SiO <sub>2</sub>	2.63

Berdasarkan klasifikasi Wardani mengklasifikasikan batubara sesuai dengan nilai kalori, abu terbang memiliki kandungan unsur mineral yang berbeda, seperti tabel di bawah ini

Tabel 2.3 Kandungan unsur berdasarkan jenis batubara <sup>[3]</sup>

Komponen (%)	Bituminus	Subbitumins	Lignit
SiO <sub>2</sub>	20 - 60	40 - 60	15 - 45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 35	20 - 30	20 - 25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 - 40	4 - 10	4 - 15
CaO	1 - 12	5 - 30	15 - 40
MgO	0 - 5	1 - 6	3 - 10
SO <sub>3</sub>	0 - 4	0 - 2	0 - 10
Na <sub>2</sub> O	0 - 4	0 - 2	0 - 6
K <sub>2</sub> O	0 - 3	0 - 4	0 - 4
LOI	0 - 15	0 - 3	0 - 5

Sedangkan menurut ASTM C618, klasifikasi abu terbang ini dibagi menjadi 2 yaitu kelas C dan kelas F. Perbedaan utama dari kedua abu terbang tersebut adalah banyaknya kadar kalsium, silika, aluminium dan besi di abu

terbang tersebut. hal yang penting diketahui, bahwa tidak semua abu terbang dapat memenuhi persyaratan ASTM C618, kecuali pada aplikasi untuk beton, dimana persyaratan tersebut harus dipenuhi. Tetapi, Nawy menjelaskan bahwa klasifikasi abu terbang yang dimana jumlah  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , lebih dari 70% sebagai Kelas F dan yang kurang sebagai Kelas C <sup>[4]</sup>. Dibawah ini merupakan tabledefinisi dari klasifikasi abu terbang berdasarkan ASTM C618.

Tabel 2.4 Klasifikasi Abu Terbang Berdasarkan ASTM C618 <sup>[3]</sup>

Abu Terbang (ASTM C618)	Komposisi Kimia	Keterangan lain
Tipe C	18 - 24,8% $\text{SiO}_2$ ; 12,1 - 14,9% $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 6,3 - 7,8% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 13,9 - 49% $\text{CaO}$ ; 18 - 25% <i>free lime</i> ; 1,9 - 2,8% $\text{MgO}$ ; 5,5 - 9,1% $\text{SO}_2$ ; 0,5 - 2% $\text{Na}_2\text{O}$ ; 1 - 3% $\text{K}_2\text{O}$	Diproduksi dari pembakaran batubara lignite atau sub-bituminous selain mempunyai sifat <i>pozzolanic</i> juga mempunyai sifat <i>self-cementing</i> (kemampuan untuk mengeras dan menambah strength apabila bereaksi dengan air) dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur
Tipe F	47,2 - 54% $\text{SiO}_2$ ; 27,7 - 24,9% $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3,6 - 11,5% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 1,3 - 4,1% $\text{CaO}$ ; 0,1 max % <i>free lime</i> ; 1,4 - 2,5% $\text{MgO}$ ; 0,1 - 0,9% $\text{SO}_2$ ; 0,2 - 1,6% $\text{Na}_2\text{O}$ ; 0,7 - 5,7% $\text{K}_2\text{O}$	Merupakan abu terbang yang diproduksi dari pembakaran batubara antrasit atau bituminous, mempunyai sifat <i>pozzolanic</i> dan untuk mendapatkan sifat <i>cementitious</i> harus diberi penambahan <i>quick lime, hydrated lime</i> , atau semen

### 2.3 Alkali Aktivator

Geopolimerisasi dari alumino-silikat telah disebutkan sebelumnya, membutuhkan larutan alkali dan waterglass sebagai alkali aktivator. Alkali



sama, perlu penambahan  $\text{Na}_2\text{O}$  lebih banyak. Davidovits menyebutkan bahwa kebutuhan akan natrium silikat ini harus dipenuhi secara optimum agar tidak terbentuknya natrium karbonat pada permukaan akibat efek kadar yang natrium silikat yang berlebih <sup>[2]</sup>.

Selain itu, Bakharev juga menjelaskan bahwa sample abu terbang batubara yang diaktivasi menggunakan natrium hidroksida jauh lebih stabil kekuatannya dibandingkan dengan abu terbang yang diaktivasi oleh natrium silikat <sup>[10]</sup>. Dalam hal ini, fasa zeolit hadir bersama fasa alkali aluminosilikat amorf dalam abu terbang yang diaktivasi oleh natrium hidroksida. Sedangkan pada abu terbang batubara yang diaktivasi oleh natrium silikat hanya terdapat fasa alkali alumino silikat amorf.

$\text{NaOH}$  dan  $\text{KOH}$  merupakan basa kuat, yang sangat mudah larut dalam air, melepas ikatan hidroksil dan membentuk ion sempurna. Selain itu, keduanya memiliki derajat ionisasi sempurna yaitu 1. Keduanya mampu bereaksi membentuk garam karbonat bila bertemu dengan  $\text{CO}_2$  pada udara di atmosfer. Kelarutan  $\text{KOH}$  dalam air yaitu 1100g/L.  $\text{KOH}$  mampu melarutkan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam air membentuk  $\text{AlO}_2^-$ . Sesuai sistem periodik, dimana kalium berada di bawah natrium pada golongan yang sama, hal ini mengartikan bahwa  $\text{K}^+$  merupakan ion yang lebih besar ukuran molekulnya dibanding dengan  $\text{Na}^+$ .

Perlu diketahui bahwa, Jaarsveld menjelaskan bahwa natrium hidroksida pada beberapa mineral berbeda dan glass yang mengandung silikat atau aluminium, mengalami 2 tahapan. Pertama, pembebasan silika, aluminium, dan lime <sup>[11]</sup>. Kedua, pembentukan hidrat kalsium silikat atau aluminat, yang sama baiknya dengan pembentukan kembali soda kaustik. Selain itu, larutan alkali mampu bereaksi dengan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  membentuk endapan  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  yang berwarna coklat kemerahan. Bila, pH larutan semakin tinggi, maka mineral  $\text{MnO}$  mampu terlarutkan juga.

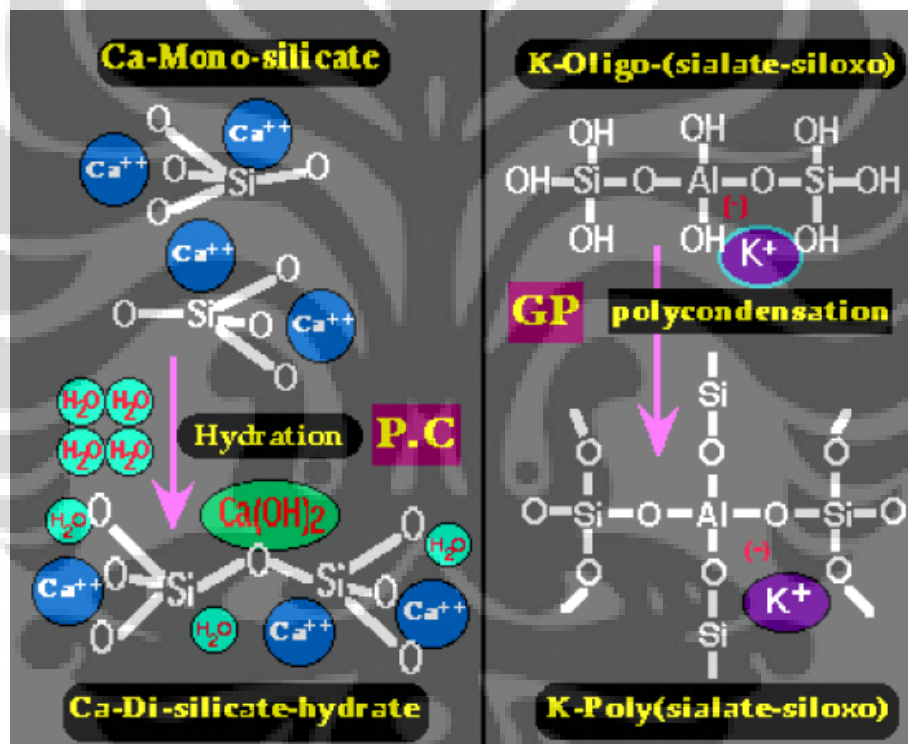
## 2.4 Geopolimerisasi

Pembuatan beton dari abu terbang ini terbentuk melalui reaksi polimerisasi. Baik kandungan Al maupun Si, yang telah terlarutkan membentuk kation, akan membentuk rantai ikatan polimer dari monomer oksidanya dibawah



lingkungan alkali sekitar  $\text{pH} > 12$ . Geopolimer yang terbentuk berbeda sifat fisik dari bahan bakunya yaitu berbentuk amorfus, sama halnya seperti polimer plastik lainnya. Dengan begitu, geopolimer akan membentuk struktur amorfus hingga semi-kristalin.

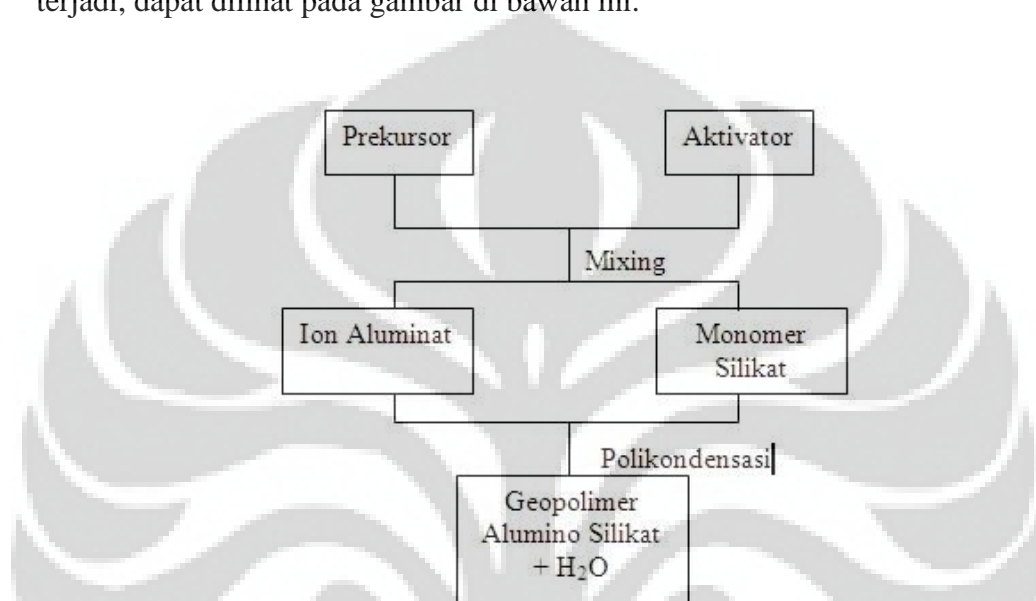
Geopolimeri ini membentuk ikatan rantai panjang saling silang antara Si-O-Al. Lain halnya dengan semen Portlan/pozzolon, geopolimer tidak membentuk ikatan *calcium-silicate-hidrates* (CHS) sebagai ikatan pembentuk matriks dan kekuatan, tetapi merupakan hasil polikondensasi prekursor dengan aktivasi alkali dan katalis panas (energi). Di bawah ini merupakan perbandingan pembentukan ikatan pada beton berbasis semen portland dan aluminosilikat geopolimer.



Gambar 2.3 Perbedaan Reaksi pada Semen Portland dan Geopolimer <sup>[8]</sup>

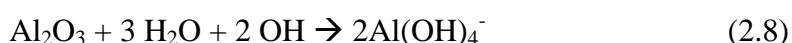
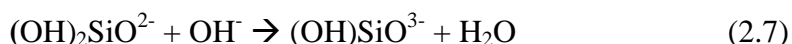
Oleh sebab itu, abu terbang dengan unsur kalsium tinggi akan membentuk CSH pada sebagian geopolimernya. Selain itu, Xu menyebutkan dalam penelitiannya berjudul '*Geopolymerisation of multiple minerals*' bahwa kandungan CaO mampu membentuk ikatan Ca-Si-Al yang mendistribusi kekuatan pada geopolimer <sup>[12]</sup>. Unsur Ca yang tinggi juga mampu membentuk ikatan bersama Si membentuk calcium-silica-hydrates (C-S-H) gel <sup>[13]</sup>.

Sintesa geopolimer ini membutuhkan 2 konstituen utama, yaitu prekursor yang kaya akan kandungan Al dan Si, dan larutan alkali silikat. Rumitnya reaksi polimer yang terjadi antara Si-O-Al ini. Davidovits menyimpulkan bahwa pencampuran prekursor dengan aktivator, akan membentuk ion aluminat dan monomer silikat, dan mengalami ikatan jaring silang polimer ketika kondensasi dimana H<sub>2</sub>O sebagai hasil dari reaksi dehidrasi <sup>[14]</sup>. Skematis ringkas proses yang terjadi, dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



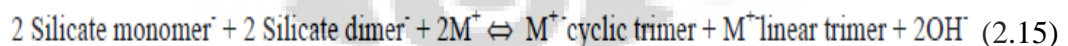
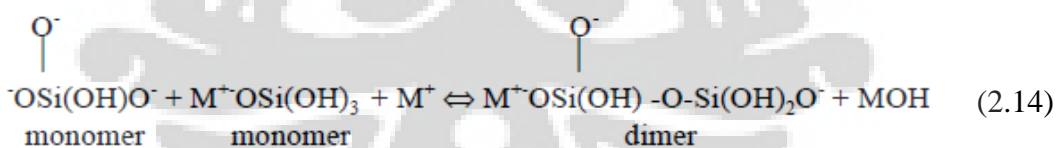
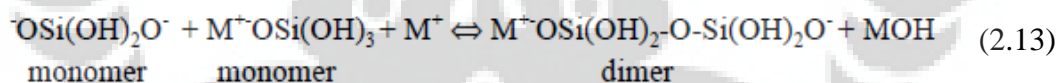
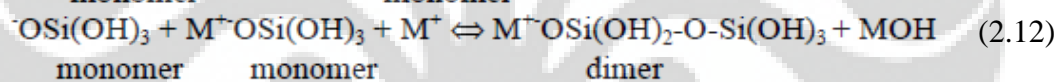
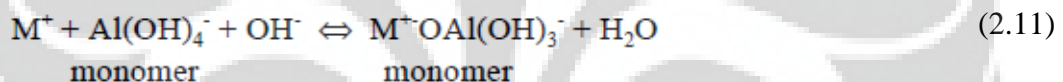
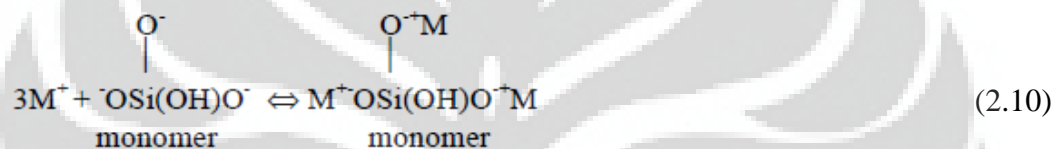
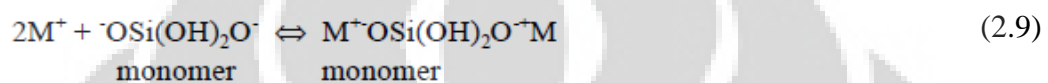
Gambar 2.4 Skematis Proses Pembentukan Geopolimer <sup>[14]</sup>

Pelarutan natrium silikat dan silika dari prekursor abu terbang batubara, dapat membentuk beberapa tipe spesies monomerik berinti Si, seperti gambar di bawah ini.



Dimana, semakin ke bawah, maka akan sedikit grup hidroksi, (OH), yang berikatan dengan Si, dan semakin tinggi pelarutan alumina membentuk anion

aluminat. Hal ini dipengaruhi oleh nilai pH campuran geopolimer tersebut. Telah disebutkan bahwa, reaksi kondensasi alumino-silika geopolimer, terjadi dengan terbentuknya ikatan baru Si-O-Al yang baru, dimana terjadi juga pelepasan H<sub>2</sub>O yang mengandung kation alkali dengan pH tinggi. Oleh karena itu, Pembentukan ikatan rantai polimer dipengaruhi oleh banyaknya grup OH<sup>-</sup> pada silikat dan banyaknya tetravalen aluminat, [AlO<sub>4</sub>]<sup>-</sup>. Reaksi dengan OH<sup>-</sup>, silika mampu membentuk monomer-monomer yang mampu berikatan dengan monomer lainnya, sedangkan aluminat hanya 1 jenis saja. Di bawah ini merupakan reaksi pembentukan dimer-dimer alumino-silikat<sup>[8]</sup>.

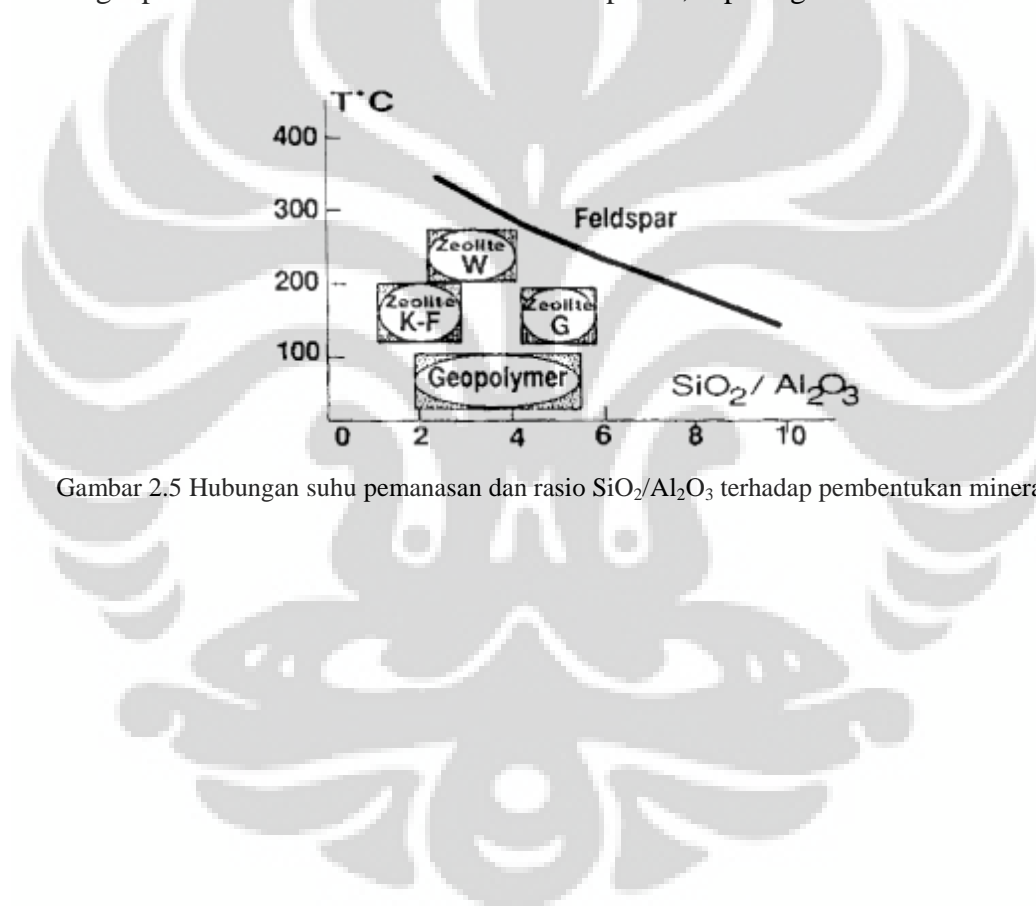


Dengan semakin banyaknya kandungan silikat, maka akan berkemungkinan untuk membentuk trimer, tetramer, pentamer, hexamer, octamer, dan seterusnya hingga mampu mencapai 32-mer.

Sesuai dengan kemungkinan reaksi yang terjadi, maka rasio Si/Al harus tinggi untuk meningkatkan kuat tekan mekanik geopolimer yang optimum. Bila Si/Al terlalu tinggi, maka akan terbentuk fasa yang berbeda, yang akan

menurunkan kekuatan geopolimer secara keseluruhan. Oleh sebab itu, Davidovits merekomendasikan rasio Si/Al tidak lebih dari 2<sup>[2]</sup>. Selain itu, kekuatan geopolimer dipengaruhi juga oleh ion positif lainnya pengganti Na<sup>+</sup> atau K<sup>+</sup>, penyeimbang kation seperti Li<sup>+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, dan H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>.

Banyak faktor yang mempengaruhi kekuatan geoplimer akibat reaksi yang rumit, dan mineral yang banyak, maka Davidovits menyarankan formulasi dengan rasio M<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> antara 0,2-0,48; SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> antara 3,3-4,5; H<sub>2</sub>O/M<sub>2</sub>O antara 10-25; M<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> antara 0,8-1,6<sup>[2]</sup>. Selain itu, perlu diketahui pula dengan meningkatnya SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atau meningkatnya suhu pemanasan, akan menggeser fasa geopolimer ke arah zeolite bahkan feldspar<sup>[7]</sup>, seperti gambar di bawah ini



Gambar 2.5 Hubungan suhu pemanasan dan rasio SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terhadap pembentukan mineral<sup>[7]</sup>

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan membuat adonan pasta geopolimer abu batubara dengan dimensi balok 1 cm x 1 cm x 8 cm. Campuran adonan pasta geopolimer ini terdiri dari bahan baku abu terbang kelas F, NaOH, KOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (*waterglass*), dan aquades, dimana komposisi telah ditentukan sebelumnya. Pasta geopolimer yang sudah jadi dilakukan pengujian kuat tekan fleksuralnya. Analisa dilakukan dengan menghubungkan hasil uji kuat tekan terhadap variabel larutan alkali dan variabel konsentrasi alkali, variable suhu *curing*, yang diberikan pada pasta geopolimer tersebut.

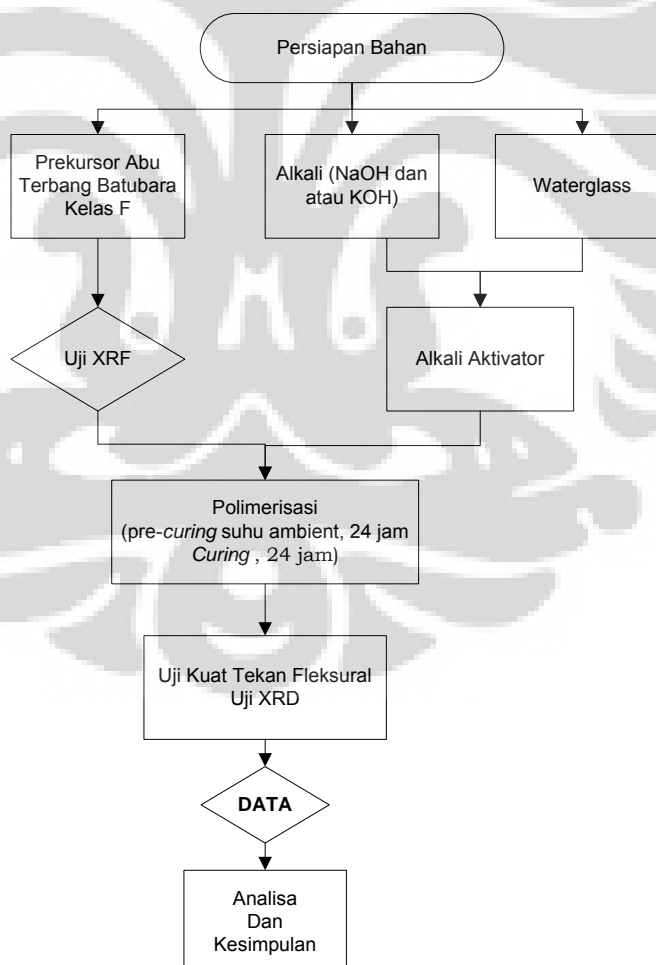
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan variabel larutan NaOH dan atau KOH. Variable konsentrasi alkali yang digunakan yaitu 8,3M, 10M, 12M dan 14M. variable suhu yang digunakan yaitu 80, 90, 100, 110<sup>0</sup>C. Rasio padat:cair yang digunakan yaitu 2:1. Selain itu *pre-curing* dilakukan pada lingkungan ambient dan *curing* dilakukan di dalam *furnace*.

#### 3.1 Diagram Alir

Di bawah ini merupakan diagram alir dari pengerjaan penelitian dari pasta geopolimer. Sesuai dengan variabel yang diberikan pada penelitian ini, dilakukan pengujian pada 20 sampel. Sesuai diagram alir di bawah ini, sebelum melakukan campuran adonan pasta geopolimer, bahan harus disiapkan seperti abu terbang kelas F hasil ayak mesh 80 (250mikron), NaOH (PA), KOH (PA), natrium silikat atau *waterglass*, dan aquabides.

Bahan baku abu terbang dilakukan uji komposisi. Hal ini dilakukan untuk mempermudah perhitungan rasio. Pertama dilakukan pelarutan alkali (NaOH dan atau KOH) bersama air yang akan digunakan, karena pelarutannya merupakan reaksi eksoterm yang menghasilkan panas sehingga perlu pendinginan hingga suhu ruang. Kemudian, dilakukan pencampuran homogen larutan alkali dengan *waterglass*, yang mengalami reaksi eksoterm juga. Setelah mencapai suhu ruang,

adonan dibuat sesuai variabel yang telah ditentukan sebagai penelitian, dibantu dengan pengadukan oleh *mixer* selama 3-5 menit. Pelepasan gelembung perlu dilakukan dengan cara didiamkan 2-3 menit. Setelah adonan pasta geopolimer dituang ke dalam cetakan, dilakukan *pre-curing* selama 24 jam pada lingkungan ambient. Hal yang harus diperhatikan saat penuangan ke dalam cetakan adalah *workability* (kemampukerjaan) adonan, kemampuan adonan dalam mengalir mengisi ruang cetakan, karena bila tidak baik maka harus dilakukan kompaksi manual agar dapat sepenuhnya menempati ruang cetakan. Adonan pada cetakan ditutup dengan plastik atau aluminium foil, untuk menghindari kontak dengan udara. Lalu dilakukan *curing* selama 24 jam di dalam *furnace*. Sampel dilakukan uji karakterisasi yang telah ditentukan dalam penelitian ini. Data yang akan dianalisa ini juga ditunjang dengan studi literatur penelitian-penelitian geopolimer sebelumnya.



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Alat dan Bahan

#### 3.2.1 Alat

- Timbangan digital

Penimbangan dilakukan dengan alat timbang digital. Alat timbang ini memiliki akurasi 1 angka di belakang koma. Di bawah ini merupakan gambar alat timbang yang digunakan.



Gambar 3.2 Alat timbang digital

- Kertas pH universal  
Kertas pH ini digunakan untuk mengetahui tingkat alkalinitas sampel, dengan nilai 1 hingga 14. Warna prediksi nilai pH akan dibandingkan dengan standar warna pH kertas universal
- Alat Gelas  
Pada penelitian ini, alat gelas yang digunakan yaitu *beaker glass* 250 dan 500 mL, gelas ukur, dan spatula. Alat-alat gelas yang digunakan, ditujukan sebagai wadah, alat ukur, dan pengaduk pada campuran pasta geopolimer. Di bawah ini merupakan alat gelas yang digunakan.



Gambar 3.3 Alat-alat gelas dan aquabidest

- Cetakan logam

Cetakan logam yang digunakan memiliki dimensi 1cmx1cmx8cm.

Cetakan logam ini dilapisi oleh plastik, untuk menghindari lengketnya sample pada cetakan dan mempermudah pembongkaran sampel dari cetakan. Di bawah ini merupakan gambar cetakan logam yang digunakan.



Gambar 3.4 Cetakan logam dimensi 1cm x 1cm x 8cm



- *Mixer*

Pengadukan homogen sampel yaitu alkali aktivator dengan abu terbang, digunakan *mixer*, dengan lama pengadukan 3-5 menit. Di bawah ini merupakan gambar *mixer* yang digunakan pada penelitian.



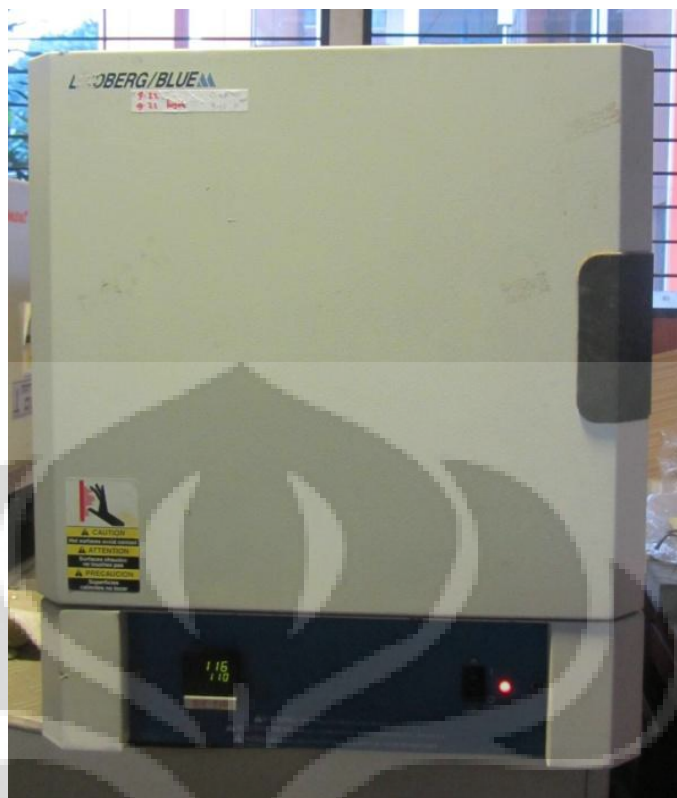
Gambar 3.5 Mixer Miyako

- X-Ray Fluorescence (XRF)

Pengujian kandungan unsur total sampel, dilakukan dengan alat uji X-Ray Fluorescence. Pengujian ini dilakukan di fakultas Matematika dan Pengetahuan Alam (MIPA) Universitas Sebelas Maret. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui klasifikasi abu terbang berdasarkan ASTM C 618 dan menghitung rasio mol.

- *Furnace*

*Furnace* digunakan untuk melakukan *curing* sampel selama 24 jam. Suhu *furnace* yang digunakan harus distabilkan terlebih dahulu. Verifikasi suhu dilakukan dengan menggunakan *thermocouple*. Di bawah ini merupakan gambar *furnace* yang digunakan.



Gambar 3.6 Furnace .

- X-Ray Diffraction (XRD)  
X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk mengetahui mineral yang terkandung pada sampel. Pengujian ini dilakukan di Univerias Islam Negeri Syarif Hidayatullah (UIN). Di bawah ini merupakan gambar XRD yang digunakan dengan merk Shimadzu Maxima X-7000.



Gambar 3.7 X-Ray Diffraction (XRD)

- Mesin uji kuat tekan flexural  
Kuat tekan tekan fleksural dilakukan dengan mesin LF Pls Series Digital Cahtillon X. Alat uji ini di dukung dengan software Nexygen v 4.5. Pengujian ini juga biasa disebut '*3 point bending test*'. Di bawah ini merupakan gambar mesin uji kuat tekan felksural.



Gambar 3.8 Mesin uji kuat tekan fleksural

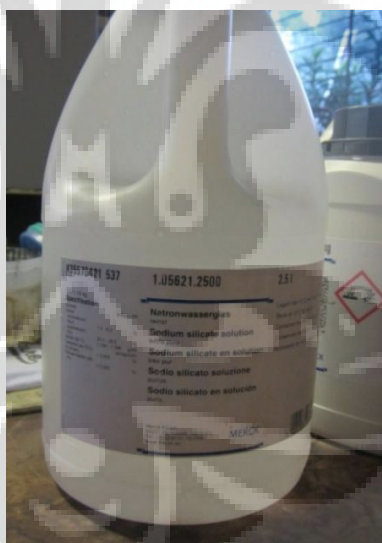
### 3.2.2 Bahan

- Abu terbang kelas F  
Abu terbang yang digunakan merupakan kelas F ASTM C618, dimana memiliki kandungan kalsium  $< 20\%$ .  
Abu terbang ini berasal dari PLTU Suralaya, Banten. Di bawah ini merupakan gambar abu terbang kelas F yang digunakan.



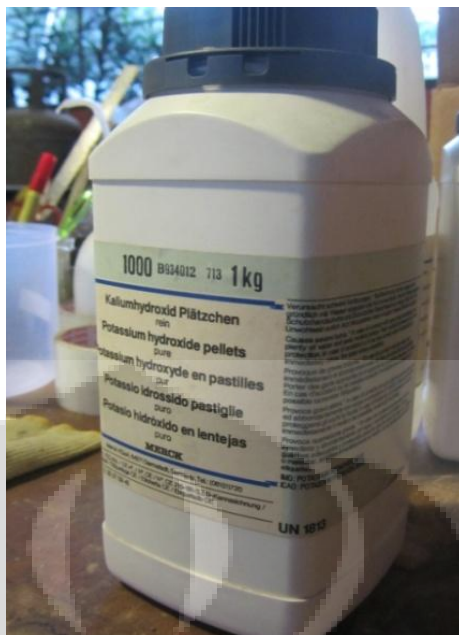
Gambar 3.9 Abu terbang kelas F

- Natrium silikat (*waterglass*)  
 Pada penelitian ini, digunakan *waterglass* pada campuran alkali aktivator. *Waterglass* ini memiliki kandungan  $\text{Na}_2\text{O}$  8% dan  $\text{SiO}_2$  27%, *waterglass* ini diproduksi oleh Merck. Di bawah ini merupakan gambar *waterglass* yang digunakan.



Gambar 3.10 Waterglass

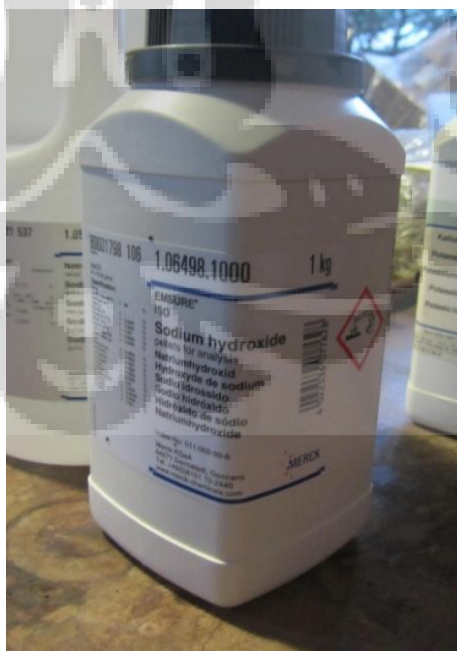
- Kalium hidroksida (PA)  
 Larutan alkali yang digunakan sebagai variable penelitian, salah satunya yaitu kalium hidroksida (KOH). KOH yang digunakan merupakan *pure analysis* (PA). Di bawah ini merupakan gambar bahan kimia KOH yang digunakan, diproduksi oleh Merck.



Gambar 3.11 Kalium Hidroksida (PA)

- Natrium Hidroksida (PA)

Alkali yang utama digunakan sebagai campuran alkali aktivator yaitu natrium hidroksida (NaOH). NaOH yang digunakan *pure analysis* (PA), diproduksi oleh Merck. Di bawah ini merupakan gambar bahan kimia NaOH.



Gambar 3.12 Natrium hidroksida (PA)

### 3.3 Metode Perhitungan Campuran

Sampel yang akan dibuat pada penelitian ini merupakan sampel geopolimer berbahan dasar abu terbang ASTM C618 kelas F, yang mampu menggantikan aplikasi bahan bangunan seperti batako atau beton. Hal ini dianggap memenuhi bila, kriteria kuat tekan fleksural pada geopolimer ini sesuai aplikasi beton semen Portland biasanya.

Klasifikasi abu terbang ASTM C 618 kelas F ini, didukung oleh hasil uji XRF. Dimana nilai kandungan Ca (kalsium) kurang dari 20%, sehingga abu terbang yang digunakan telah sesuai. Selain itu, rasio mol Si/Al adalah tetap, dimana tidak ada penggunaan variabel *waterglass* pada penelitian ini, yaitu sebesar 2.96. Dengan rasio pada rentang 1.8 – 3.6, Khale menyarankan waktu *pre-curing* 24 jam untuk hasil optimum pembentukan rantai geopolimer<sup>[7]</sup>. Di bawah ini merupakan tabel hasil uji XRF dan perhitungan rasio mol Si/Al.

Di bawah ini merupakan data hasil uji XRF dan contoh perhitungan rasio Si/Al terdapat pada Lampiran 1 dan 2.

Tabel .3.1 Data hasil uji XRF

Komposisi mineral	Konsentrasi , (%)	Massa relatif (Mr), (g/mol)
SiO <sub>2</sub>	36.57	60,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.26	159,70
<b>CaO</b>	<b>16.55</b>	<b>56.08</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.08	85,96
MgO	4.78	40.30
SO <sub>3</sub>	1.50	80.06
Na <sub>2</sub> O	1.28	61.98
K <sub>2</sub> O	1.27	94.2
TiO <sub>2</sub>	1.16	79.9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.50	141,94

Tabel 3.2 Perhitungan rasio silica terhadap aluminium

Mineral	Massa atom atau molekul relative (g/mol)	Massa bagian pada abu terbang (g)	Massa bagian pada <i>waterglass</i> (g)	Konsentrasi (mol)	Rasio
SiO <sub>2</sub>	60.09	60.95	13.5	1.2390	3.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85.96	26.80	-	0.3118	
<b>Si</b>	28.09			0.5792	<b>2.96</b>
<b>Al</b>	26.98			0.1957	

Kuantitas komposisi semua bahan yang akan digunakan, ditentukan sesuai penelitian geopolimer yang telah dilakukan sebelumnya, dimana telah diuji mampu-cetaknya dengan kuat tekan yang diperoleh. Bobot total komposisi yang digunakan yaitu sekitar 250 gram. Pasta geopolimer ini terdiri dari abu terbang kelas F sebanyak 66,7%, larutan alkali sebanyak 13,3%, *waterglass* sebanyak 20%.

Larutan alkali terdiri dari NaOH dan atau KOH, yang dilarutkan dengan aquabides. Variasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu variasi penggunaan alkali, dimana digunakan KOH dan NaOH, untuk perbandingan. Selain bahan baku, variabel yang digunakan yaitu konsentrasi alkali saja dimana abu terbang, natrium silikat dan aquabidest yang digunakan sama.

Pembahasan penelitian ini, akan dititikberatkan kepada proses kimiawi yang terjadi, perbedaan pengaruh alkali dan konsentrasi yang digunakan terhadap geopolimerisasi terhadap kuat tekan fleksural. Selain faktor teknis yang telah disebutkan, faktor ekonomis juga perlu diperhitungkan. Di bawah ini merupakan tabel sampel sesuai variasi komposisi dan konsentrasi yang telah ditetapkan.

Tabel 3.3 Komposisi pada variable sampel pasta geopolimer

Kode sample	Komposisi (gr)					Suhu Curing (°C)
	Abu Terbang kelas F	NaOH	H <sub>2</sub> O	KOH	Waterglass	
KOH	166,7	-	25	8.3	50	80
Campuran		4.15		4.15		
NaOH		8.3		-		
NaOH90		8.3	-	-		90
KOH90		-	33			90
NaOH100		8,3	25	-		100
NaOH110		8,3	25	-		110
NaOH9010		8,3	25	-		90
NaOH9012		33,3	-	-		
NaOH9014		33,3	-	-		

### 3.4 Prosedur Pembuatan Sampel

Hal yang pertama dilakukan yaitu persiapan bahan dan alat. Sesuai variable yang telah ditentukan, semua bahan ditimbang sebelum membuat adonan pasta geopolimer. Suhu oven sesuai variable disiapkan, sehingga setelah *pre-curing*, sampel bisa langsung dilakukan *curing* di dalam *furnace*.

Ketelitian penimbangan yaitu 1 digit angka dibelakang koma. Ada dua teknik yang bisa digunakan pada proses pencampuran bahan menjadi adonan pasta geopolimer, yaitu teknik langsung dan tidak langsung. Pada penelitian ini, dilakukan teknik tidak langsung. Teknik tidak langsung meliputi pelarutan alkali dengan aquabidest terlebih dahulu. Proses ini merupakan reaksi eksoterm yang menghasilkan panas. Panas yang timbul harus dihindari dari campuran bahan lain, untuk menghindari reaksi-reaksi yang mungkin terjadi akibat panas tersebut. pelarutan dilakukan diatas wadah yang berisi air, untuk menyerap panas yang timbul. Setelah larutan alkali tepat suhu ruang, dilakukan pencampuran dengan *waterglass*, dimana reaksi yang terjadi yaitu eksoterm.



Oleh sebab itu, dilakukan pendinginan di lingkungan ambient (tidak seperti pelarutan alkali). Kemudian dilakukan pencampuran dengan abu terbang, dengan bantuan *mixer* untuk pengadukan, selama 3-5 menit. Untuk menghilangkan gelembung yang terbentuk akibat pengadukan, adonan pasta geopolimer didiamkan 2-3 menit sebelum dicetak, tergantung dari kekentalan (*workability*) yang terbentuk pada sampel agar tidak mempersulit pencetakan sampel.

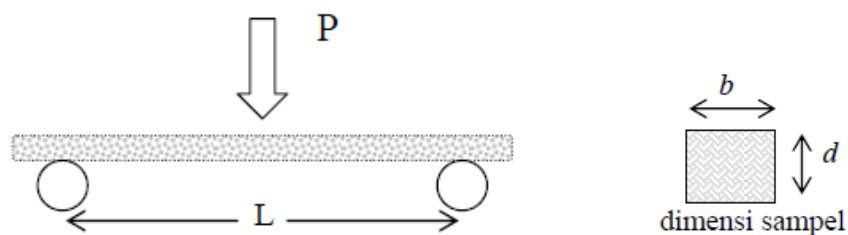
Sampel yang sudah dalam cetakan tanpa gelembung pada permukaan sample, dibungkus dengan plastic hingga dipastikan sample terisolasi dari udara luar. Dilakukan *pre-curing* pada lingkungan ambient selama 24 jam terhitung sejak sampel dilakukan pencetakan. Curing pada suhu yang telah ditetapkan sesuai variable, dilakukan selama 24 jam terhitung sejak sampel dimasukkan ke dalam oven yang sudah stabil suhunya. Duplikasi yang dilakukan untuk tiap sampel yaitu 2, sehingga total sampel yang akan dianalisa sebanyak 20. Variasi yang telah ditetapkan pada penelitian ini, ditujukan untuk melihat nilai kuat tekan fleksural optimum pada variable larutan alkali, konsentrasi larutan alkali dan suhu curing, yang diaplikasikan pada sampel.

### 3.5 Proses Uji Karakterisasi

#### 3.5.1 Uji Kuat Tekan Fleksural

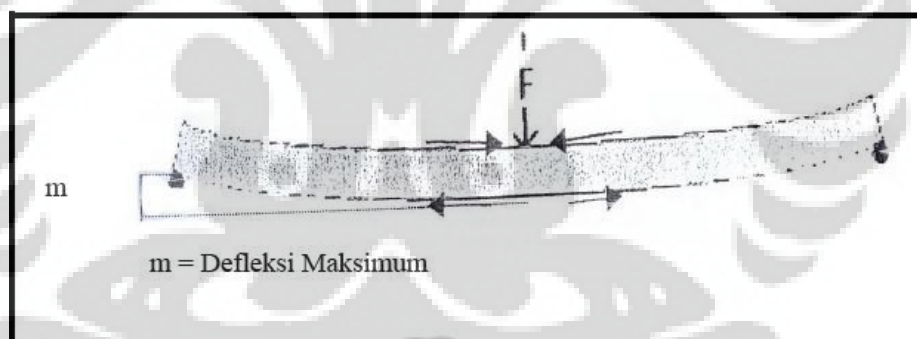
Kekuatan fleksural merupakan kekuatan suatu material untuk menerima beban yang diberikan pada bagian tengah sebuah benda berbentuk batang yang bertumpu pada kedua ujungnya. Selama batang ditekan maka beban akan meningkat secara beraturan dan berhenti ketika batang uji patah. Kekuatan tekan fleksural atau kekuatan patah menyatakan ukuran ketahanan bahan terhadap tekanan mekanis dan tekanan panas (*thermal stress*). Persamaan kekuatan patah (*Flexural Strength*) suatu bahan dinyatakan sebagai berikut :

$$\text{Kekuatan patah} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.1)$$



Gambar 3.13 Skematis pengujian kuat tekan fleksural

Dimana,  $b$  dan  $d$  merupakan dimensi (panjang dan lebar),  $L$  yaitu jarak antara 2 penumpu sampel dan  $P$  merupakan gaya yang diberikan untuk sampel hingga patah. Sebelum mengalami perpatahan, sample ini akan mengalami mekanisme yang dinamakan defleksi. Pada mekanismenya, bagian atas permukaan sampel akan mengalami kompresi dan bagian bawah permukaan sampel akan mengalami tarikan., dimana bagian tengah imajiner sampel disebut bidang netral. Besarnya tekanan atau tarikan bertambah besar bila semakin menjauhi bidang netral. Nilai maksimumnya dapat dihitung dengan rumus kuat tekan fleksural yang telah disebutkan diatas.



Gambar 3.14 Skematis pembentukan defleksi <sup>[1]</sup>

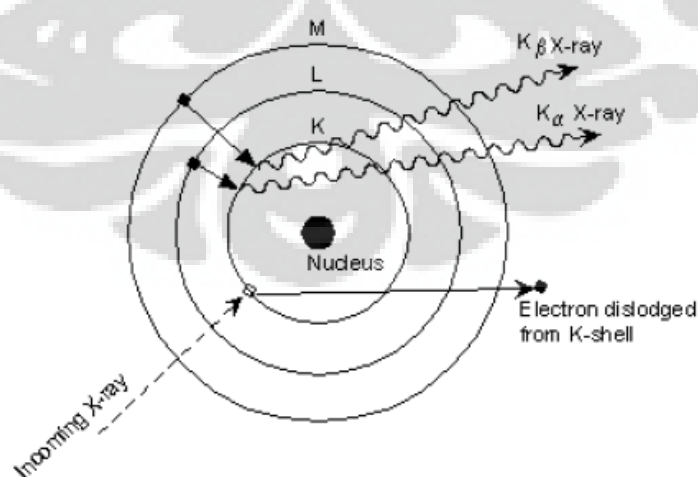
Sampel uji kuat tekan fleksural ini berdimensi 1cm x 1cm x 8cm. uji tiap variabel dilakukan sebanyak 3 duplikat.hal ini ditujukan agar data mampu represntatif secara statistik. Nilai kuat tekan fleksural ini, dibentuk oleh kekuatan ikatan antara alumino-silikat yang terbentuk. Selain itu, derajat polimerisasi geopolimer ini juga merupakan hal yang paling berpengaruh terhadap nilai kuat tekan fleksuralnya.

### 3.5.2 Uji X-Ray Fluorescence (XRF)

Uji XRF ini bertujuan untuk mengetahui komposisi unsur material abu terbang yang akan dikategorikan sebagai material kelas F sesuai spesifikasi yang telah ditetapkan ASTM C618. Selain itu, data yang diperoleh merupakan data yang akan digunakan untuk hitungan campuran bahan (rasio) dengan bahan lain seperti unsur natrium, kalium, silika, Aluminium, Kalsium, Besi, Mangan, dan lainnya, yang terkandung dalam bahan.

Uji spektroskopi XRF ini merupakan uji yang menggunakan sinar-X yang akan berinteraksi dengan sample yang merupakan unsur anorganik (mineral pada umumnya). Di bawah ini merupakan skematis interaksi sinar X dengan atom suatu unsur. Pada prinsipnya, Skoog menjelaskan telah terjadi absorpsi sinar X akan menghasilkan ion terkesitasi pada elektronnya yang kemudian akan kembali lagi ke posisi semula melalui transisi yang melibatkan elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi<sup>[15]</sup>

Elektron yang terksitasi akan meninggalkan kulit lapisan K ketika mengabsorpsi sinar x pada panjang gelombang yang lebih rendah dari 0,14 Å. Dalam waktu yang cepat, elektron tersebut akan kembali ke posisi lapisan semula dengan menghasilkan emisi radiasi-X (floresens) yang identik untuk setiap ion. Di bawah ini merupakan gambar skematis interaksi elektron pada suatu ion dengan sinar-X.

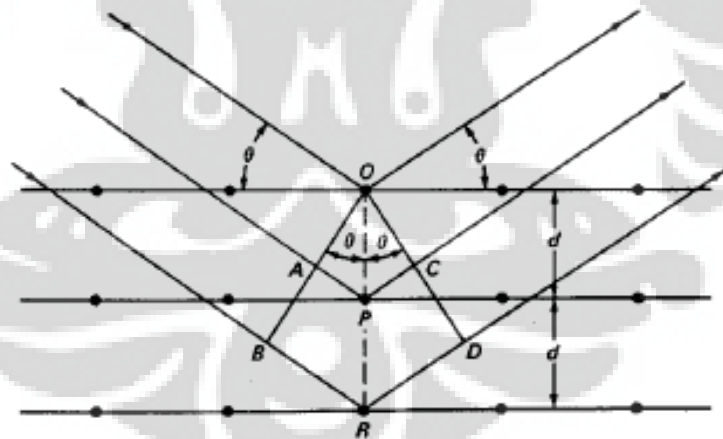


Gambar 3.15 Skematis interaksi X-Ray dan elektron pada XRF<sup>[15]</sup>.

### 3.5.3 Uji X-ray Diffraction (XRD)

Bahan baku abu terbang dan pasta geopolimer, dilakukan uji XRD yang bertujuan untuk mengetahui hasil polimerisasi geopolimer yang diintrepetasikan melalui kristalinitas hasil uji XRD. Dengan begitu, hasil kekuatan sampel geopolimer mampu dikaitkan dengan hasil polimerisasi melalui data uji XRD. Data XRD berbeda dengan data XRF yang memunculkan kuantitas total unsur-unsur, dimana data XRD memunculkan nama mineral-mineral yang terkandung di dalam sampel.

Pada prinsipnya, XRD melibatkan sinar-X yang berinteraksi dengan bentuk kristal struktur suatu mineral. Oleh sebab itu, hanya mineral dengan bentuk kristalin yang akan terbaca oleh alat XRD. Ketika sinar-X menyentuh suatu permukaan kristal struktur mineral dengan sudut tertentu, dimana sebagian akan berpendar pada lapisan pertama dan bagian yang tidak berpendar akan berpendar akibat menghantam atom pada lapisan kedua, dan seterusnya pada lapisan di bawahnya. Hukum ini disebut dengan Bragg's Law. Di bawah ini merupakan gambar skematis interaksi X-Ray pada struktur kristal mineral <sup>[15]</sup>.



Gambar 3.16 Skematis interaksi X-Ray dan elektron pada XRD<sup>[15]</sup>.

Sudut  $\theta$  yang dibentuk oleh interaksi pendar X-ray dengan atom O, P dan R, dianggap memiliki jarak,

$$AP + PC = n\lambda \quad (3.2)$$

Dimana,  $AP = PC = n\lambda$ , sehingga

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.3)$$

Persamaan diatas menunjukan bahwa pangjang gelombang identik dengan besar sudut, sehingga tiap mineral yang terdiri dari banyak kombinasi unsur akan memiliki beberapa puncak intensitas X-ray. Oleh sebab itu, minimal 3 puncak pada suatu mineral sudah mampu dianggap valid.



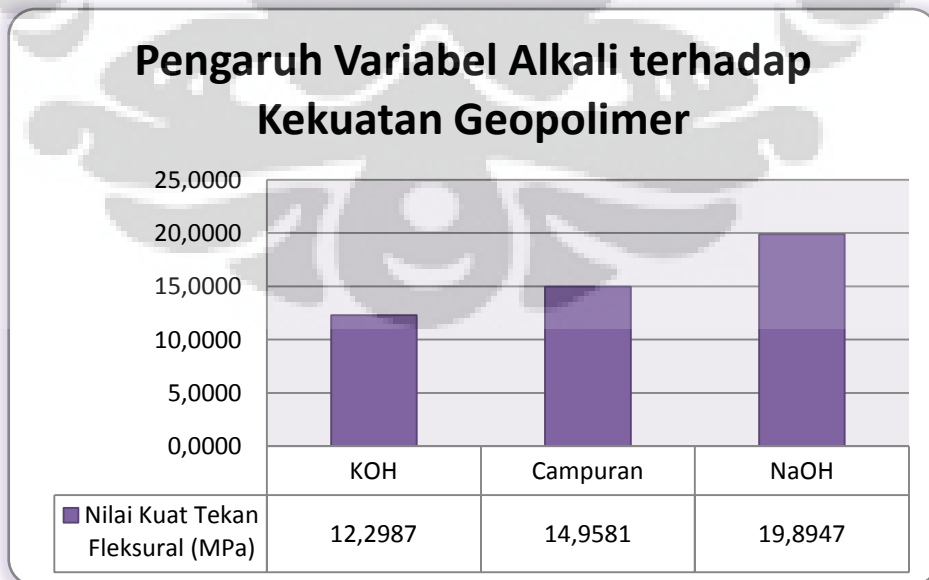
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, sesuai dengan Tabel 3.1 dan 3.2, abu terbang yang digunakan merupakan abu terbang kelas ASTM C 618 kelas F dengan rasio Si/Al 2.96. Pada penelitian ini dilakukan variable pengujian untuk mencari optimasi nilai kuat tekan fleksural geopolimer abu terbang kelas F terhadap variasi kondisi, diantaranya variable alkali, konsentrasi alkali dan suhu *curing*.

#### 4.1 Optimasi Variabel Alkali

Pada umumnya, KOH dicampurkan dengan kalium silikat ( $K_2SiO_3$ ) sebagai campuran alkali aktivator. Pada penelitian ini, telah dilakukan penggunaan alkali aktivator dengan berbeda larutan alkali yaitu KOH, NaOH, dan campuran keduanya dengan perbandingan 1:1, yang dicampur dengan aktivator yang sama yaitu *waterglass*. Di bawah ini merupakan grafik hasil uji kuat tekan fleksural geopolimer abu terbang yang dilakukna *pre-curing* selama 24 jam dan *curing* suhu  $80^{\circ}C$  selama 24 jam.



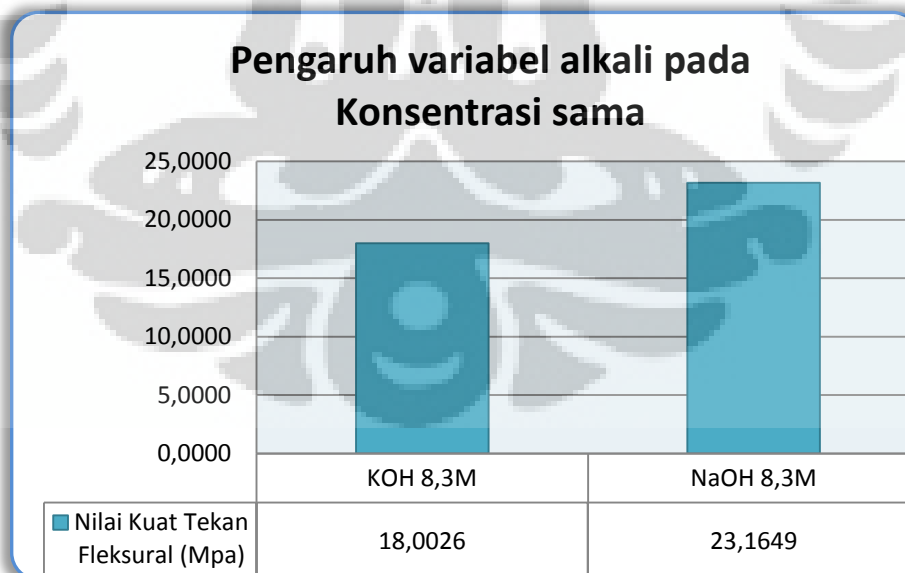
Gambar 4.1 Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Fleksural terhadap Variable Alkali pada *Curing*  $80^{\circ}$ .

Data hasil uji diatas menunjukkan bahwa KOH menurunkan nilai kuat tekan fleksural. Pada penelitian ini, dilakukan penimbangan alkali sebesar 8.3 gram. Dengan penimbangan berat yang sama dengan NaOH, KOH akan memberikan nilai konsentrasi yang lebih rendah karena unsur kalium memiliki massa relatif atom sebesar 39,1 g/mol dimana Na sebesar 23 g/mol. Dengan kata lain, pada bobot yang sama jumlah ion  $K^+$  akan lebih sedikit dibanding jumlah ion  $Na^+$ , yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1.

Hal ini pun menjelaskan bahwa ion  $K^+$  memiliki molekul yang lebih besar dibandingkan dengan ion  $Na^+$ . Oleh karena itu, dilakukan pengujian lanjut kuat tekan fleksural pada konsentrasi yang sama antara NaOH dan KOH, yaitu 8,3M pada suhu *curing*  $90^{\circ}C$ , yang ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 4.2.

Tabel 4.1 Perhitungan mol alkali pada penimbangan bobot yang sama

Alkali	Massa relative, Mr (g/mol)	Bobot penimbangan, (g)	Konsentrasi (mol)
NaOH	39.99	8,3	0.21
KOH	56.1	8,3	0.15

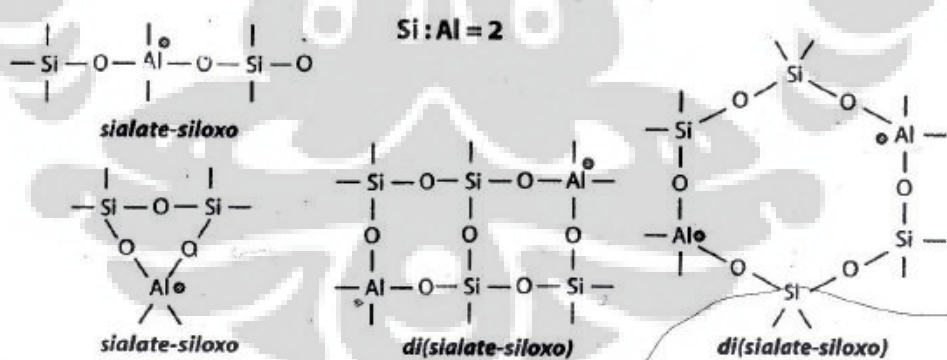


Gambar 4.2 Pengaruh Variabel Alkali pada Konsentrasi Sama Terhadap Kuat Tekan Fleksural

Grafik pada Gambar 4.2 menunjukkan hal yang sama pada grafik sebelumnya (Gambar 4.1), dimana KOH berpengaruh menurunkan nilai kuat tekan fleksural geopolimer. Ion  $K^+$  dan  $Na^+$ , merupakan kation penyeimbang anion atau muatan negatif. Molekul ion  $K^+$  yang lebih besar dari  $Na^+$ , akan menjadi penyeimbang tetravalen-Al yang berikatan dengan oligomer Si yang lebih besar pula.

Tetravalen-Si mampu membentuk monomer, dimer, trimer, hingga 32-mer.  $Na^+$  dengan ukuran molekul lebih kecil hanya mampu menyeimbangi muatan hingga oligomer silikat yang kecil (6-13) membentuk linear (-Si-O-Si-O-Al-O-) atau mono-siloxo-sialate. Sedangkan  $K^+$  hanya mampu menyeimbangi muatan tetravalen-Al dengan oligomer silikat yang lebih besar (13-32), membentuk polimer lingkaran atau *cyclic*. Oleh sebab itu, kation penyeimbang sangat mempengaruhi kekuatan geopolimer berdasarkan bentuk struktur polimer (*framework*).

Sesuai dengan data perhitungan rasio Si/Al pada Tabel 3.2, yaitu sebesar 2.96, dimana abu terbang ini mampu membentuk poli(sialate-siloxo) dengan 3 bentuk yaitu sialate-siloxo linier, di(sialate-siloxo) bentuk mono ataupun lingkaran, seperti gambar di bawah ini.

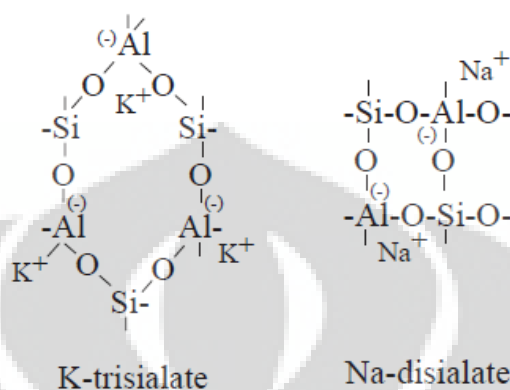


Gambar 4.3 Isomorf Struktur Monomer Poly(Sialate-siloxo)<sup>[2]</sup>

Kemampuan pembentukan isomorf monomer dari geopolimer ini dipengaruhi oleh kation penyeimbang muatan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.4. Andini menemukan bahwa baik polimer poli-sialate-siloxo (PSS) ataupun poli-silatae-disiloxo (PSDS), akan memiliki nilai kekuatan yang lebih



besar oleh alkali aktivator kalium dibanding natrium <sup>[16]</sup>. Tetapi formula ini terjadi pada alkali aktivator pasangannya, dimana NaOH dengan Na-*waterglass* dan KOH dengan K-*waterglass*.

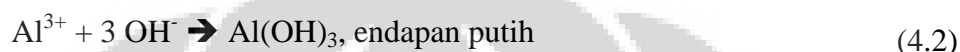
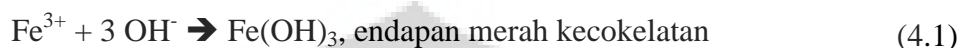


Gambar 4.4 Isomorf struktur pada pasangan kation berbeda <sup>[8]</sup>

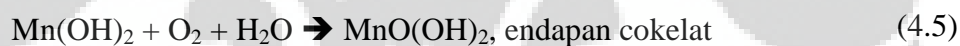
Pada prinsipnya, polimer non-linear akan memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibanding polimer linear. Penjelasan sebelumnya menunjukkan bahwa polimer dengan penyeimbang muatan ion  $K^+$  akan memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibanding dengan  $Na^+$ . Pada penelitian ini, terjadi penurunan kuat tekan fleksural karena ion  $K^+$  tidak secara optimal menjadi penyeimbang muatan polimer. Ion  $OH^-$  dan  $Na^+$ , pada larutan alkali bekerja secara aktif melarutkan unsur dan membentuk oligomer silikat rendah dibandingkan dengan pembentukan oligomer silikat tinggi. Hal ini dipengaruhi oleh waterglass yang digunakan merupakan jenis natrium dimana terdapat 8%  $Na_2O$  atau 0.129 mol tambahan natrium.

Larutan alkali pada sistem geopolimer, selain berfungsi pelarut unsur Al membentuk  $[AlO_4]^-$  dan Si membentuk  $[SiO_4]$ , tetapi juga sebagai ion penyeimbang pada polimer. Dengan kata lain, banyaknya monomer yang terbentuk sama dengan sama dengan ion positif penyeimbang. Davidovits menyebutkan bahwa ion positif penyeimbang ini bisa berupa  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $Li^+$   $H_3O^+$  <sup>[7]</sup>. Kation yang mampu berpasangan, dipengaruhi oleh ukuran molekulnya, sehingga bila ada molekul mengandung Ca maka akan distabilkan oleh kation  $K^+$ , karena sama-sama makromolekul.

Perlu diingat bahwa larutan alkali pada sistem geopolimer dengan pH tinggi (pH 14), dilakukan dengan pengujian menggunakan kertas pH universal. Sistem tersebut mampu membebaskan ion  $\text{Fe}^{2+}$  yang membentuk endapan merah kecokelatan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Shevla menjelaskan bahwa endapan ini tidak akan larut kembali pada  $\text{OH}^-$  berlebih, yang berbeda dengan endapan putih  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , yang dijelaskan oleh reaksi di bawah ini <sup>[17]</sup>.



Larutan alkali dengan pH 14, akan mampu melarutkan unsur Mn menjadi endapan putih  $\text{Mn}(\text{OH})_2$ , yang secara mudah teroksidasi membentuk endapan coklat Mangan Dioksida Hidrat,  $\text{MnO}(\text{OH})_2$ , bila bertemu dengan udara bebas. Reaksi tersebut, dijelaskan secara skematis di bawah ini.

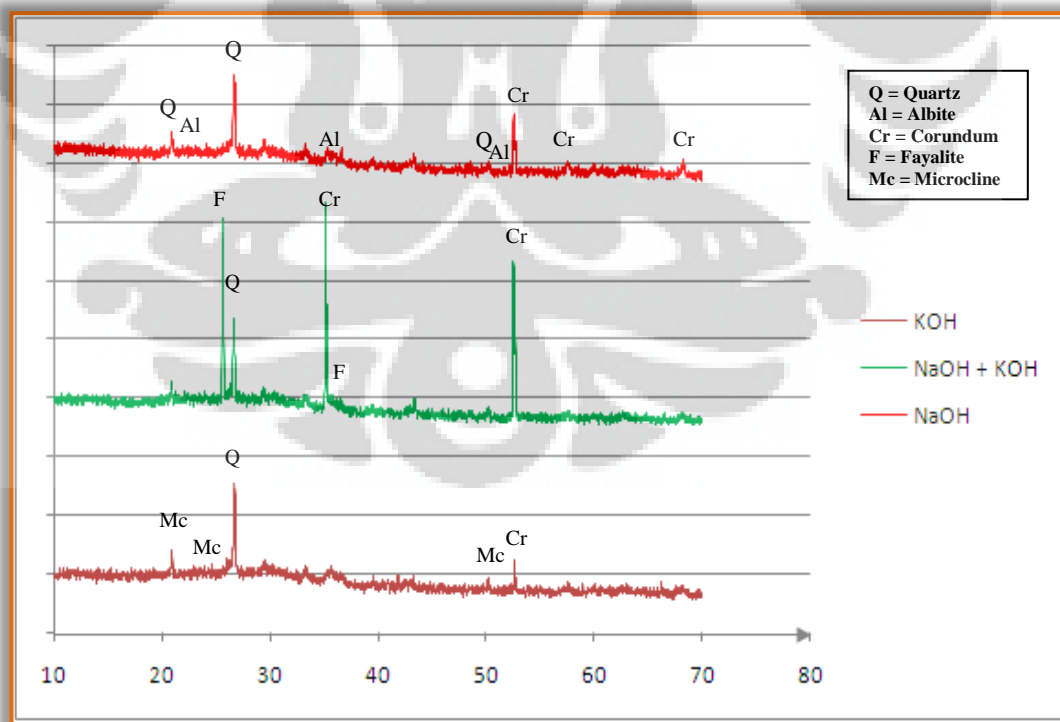


Dengan reaksi-reaksi yang telah dijelaskan diatas, sangat mungkin bahwa endapan hitam pada permukaan sampel pasta geopolimer merupakan endapan  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Sesuai dengan data hasil uji XRF dengan kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tinggi yaitu 16,55%, dimana sedikit mengandung MnO yaitu sebanyak 0,18%. Selain itu, unsur karbon tidak terdeteksi oleh hasil uji XRF. Kandungan CaO yang tinggi yaitu sebesar 16,55%, mampu mengganti  $\text{Na}^+$  dan  $\text{K}^+$  sebagai ion penyeimbang muatan. Selain itu ion  $\text{Ca}^{2+}$  yang terlarut mampu membentuk garam kalsium berupa endapan putih.

Optimasi pelarutan Si dan Al, dan pembentukan oligomer Si, akan berkurang dengan banyaknya unsur lain yang mampu bereaksi bersama ion  $\text{OH}^-$  dan sehingga mampu menurunkan alkalinitas (pH). Keberadaan  $\text{Ca}^+$  juga akan mengganggu geopolimerisasi melalui cara bereaksi dengan Al dan Si membentuk

senyawa lain. Dengan banyaknya unsur yang mampu membentuk banyak kemungkinan reaksi menyebabkan berkurangnya optimasi pembentukan geopolimer Si-O-Al amorfus. Dengan kata lain, terbentuk kekuatan geopolimer yang kurang optimum, walaupun tidak semua kekuatan dikontribusi oleh bentuk amorfus.

Dalam hal ini, tingkat kristanilitas tidak mempengaruhi kekuatan presentatif geopolimer. Unsur Si lebih mudah dilarutkan dibandingkan dengan unsur Al oleh larutan alkali. Selain itu, Xu menyebutkan bahwa NaOH mampu melarutkan Si dan Al yang lebih banyak dibandingkan dengan KOH [12]. Nilai kuat fleksural yang dibentuk pasta geopolimer, dibentuk oleh ikatan unsur-unsurnya. Pada sistem geopolimer ini, banyak terbentuk ikatan kovalen. Kekuatan ikatan pada atom dengan molekul besar akan lebih kuat dibanding dengan molekul kecil. Dengan kata lain Si-O-Si memiliki kekuatan yang lebih besar dibanding Si-O-Al dan Al-O-Al. Hasil pelarutan alkali dan reaksi yang terjadi pada sistem geopolimer pada variabel alkali, dapat ditunjang penjelasannya oleh data hasil uji XRD, pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.5 Data Hasil Uji XRD Sampel Pasta Geopolimer Variabel Alkali *Curing* 80°C

Sesuai data hasil uji, ketiga sampel memiliki puncak-puncak mineral yang hampir sama, dengan intensitas berbeda. Puncak-puncak tinggi berada pada mineral  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . puncak berbeda terjadi pada sampel campuran dimana terbentuk mineral fayalite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ). Keterangan mineral dengan sudut  $2\theta$  terdapat pada Tabel 4.2 di bawah ini, dengan data *software* pada Lampiran 4.

Tabel 4.2 Hasil Analisa Mineral Hasil Uji XRD

Mineral	$2\theta$ ( $^\circ$ )
$\text{SiO}_2$ (Q)	26.68; 36.48; 42.49; 50.24
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (Cr)	35.25; 52.60; 57.57
$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (F)	25.15; 36.11; 35.09
$\text{AlKO}_8\text{Si}_3$ (Mc)	20.96; 23.73; 25.65
$\text{AlNaO}_8\text{Si}_3$ (Al)	22.13; 35.75; 51.54

Sesuai analisa data hasil uji XRD pada Tabel 4.4, pasta geopolimer yang menggunakan KOH pada alkali aktivator, memiliki puncak-puncak tinggi pada mineral  $\text{SiO}_2$  yang lebih rendah dibanding dengan geopolimer menggunakan NaOH. Hal tersebut menunjukkan bahwa larutan alkali kalium dibandingkan dengan larutan alkali natrium, tidak lebih banyak melarutkan mineral silika. Selain mol  $\text{OH}^-$  yang berbeda, grafik pada Gambar 4.1 mendukung pernyataan ini.

Hal ini juga terbukti oleh adanya intensitas *hematite* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) yang terdeteksi pada sampel geopolimer KOH (*data software*), dimana hal tersebut tidak terjadi pada sampel geopolimer NaOH maupun campuran. Hal inilah yang menyebabkan pasta geopolimer KOH memiliki kekuatan tekan fleksural paling rendah yaitu sebesar 12.298 MPa. Penggunaan larutan alkali kalium, menyebabkan terbentuknya aluminosilikat yang terstabilkan oleh kation  $\text{K}^+$  membentuk mineral *microcline* ( $\text{KAlO}_8\text{Si}_3$ ). Mineral ini membentuk struktur amorfus, sehingga tidak terlihat puncak kristalin pada area tersebut. Pembentukan struktur amorfus terlihat dengan puncak yang rendah dan melebar. Selain itu, terdapat pula puncak-puncak *albite* ( $\text{NaAlO}_8\text{Si}_3$ ) dengan intensitas rendah. Hal ini disebabkan karena adanya kation  $\text{Na}^+$  yang berasal dari *waterglass*.

Rentang area puncak *microcline* dan *albite*, hampir sama karena merupakan mineral dasar Al-O-Si. Hal ini mengakibatkan puncak terlihat sama dan bila keduanya terbentuk, maka akan saling tumpang tindih. Sampel pasta geopolimer menggunakan larutan alkali NaOH, memiliki puncak mineral yang identik dengan sampel formulasi KOH, tapi berbeda intensitas.

Rendahnya puncak SiO<sub>2</sub> menunjukkan, bahwa alkali Na mampu melarutkan Si dan Al dengan baik, membentuk aluminosilikat amorfus yang distabilkan oleh kation Na. Hal ini terbukti dengan terdeteksinya mineral *albite* (AlNaO<sub>8</sub>Si<sub>3</sub>).

Pada sampel geopolimer NaOH, baik Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, memiliki puncak yang lebih rendah dibanding dengan formulasi KOH. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi pembentukan tingkat Si-O-Al amorfus yang lebih tinggi dibanding sampel formulasi KOH. Perbedaan ini meningkatkan nilai kuat tekan fleksural pasta geopolimer sebanyak 7.5960 MPa.

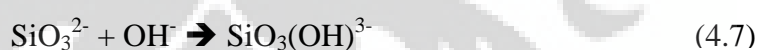
Konsekuensi ini, terjadi karena penstabilan muatan negatif monomer Si-O-Al oleh ion K<sup>+</sup> membutuhkan oligomer yang lebih besar. Pembentukan oligomer lebih besar membutuhkan peran ion OH<sup>-</sup> untuk monomer silikat yang mampu berikatan dengan monomer silikat lainnya. Dengan kata lain, semakin banyak penggunaan OH<sup>-</sup> pada pembentukan oligomer silikat, maka akan semakin sedikit pelarutan mineral Al. oleh sebab itu, terjadi perbendaan nilai kuat tekan fleksural yang signifikan pada pasta geopolimer.

Kuat tekan fleksural geopolimer alkali campuran, memiliki kuat tekan yang lebih baik dari pasta geopolimer KOH, yaitu 14.9581 MPa. Sesuai dengan data XRD, Puncak-puncak tinggi mineral yang muncul yaitu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan *fayalite*. Abu terbang kelas F ini memiliki kandungan tertinggi SiO<sub>2</sub> sebesar 36.57%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 19.26%, dan CaO sebanyak 16.55%. Dengan munculnya kristalin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang tinggi, hal ini menunjukkan terjadinya pelarutan mineral Si dan Al yang tidak diharapkan. Selain itu, hal ini menunjukkan bahwa sedikit terbentuknya senyawa aluminosilikat dengan struktur amorfus yang diharapkan saat rekasi polikondensasi.

Amorfus geopolimer Si-O-Al yang terbentuk sedikit karena tingginya Al yang tidak bereaksi Si, membentuk ikatan dengan Fe, Ca dan atau Al yang terlarut. Hal ini ditunjukkan oleh hasil uji XRD, dimana terbentuk senyawa fayalite dan omphacite. Fayalite merupakan senyawa  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ . Sedangkan omphacite merupakan senyawa Ca-Fe-Si-Na-Al, dimana persentase Al merupakan yang paling sedikit pada senyawa tersebut.

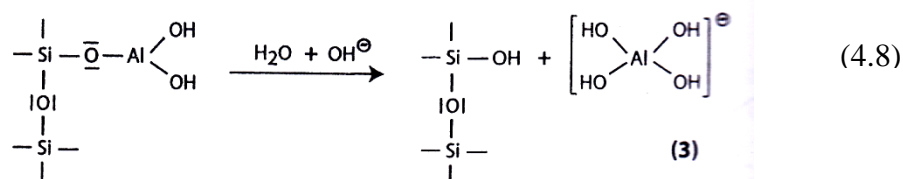
Winnefeld menemukan bahwa geopolimer abu terbang dengan kandungan kalsium tinggi akan memiliki struktur kristalin lebih banyak dibanding dengan struktur amorfus, lain halnya dengan abu terbang dengan kandungan kalsium rendah <sup>[18]</sup>. Selain sampel 1AB, sample 1A pun menunjukkan terbentuknya sedikit senyawa Ca-O-Si (*wollastonite*).

Pada sample pasta geopolimer dengan alkali campuran ini, KOH memiliki konsentrasi 2,95M dan NaOH 4,15M. terlihat bahwa pada larutan alkali memiliki kation  $\text{Na}^+$  yang lebih banyak dibandingkan dengan kation  $\text{K}^+$ . selain itu, banyaknya kation  $\text{Na}^+$  dikontribusi oleh *waterglass* sebanyak 0.05 mol Na. Ion silikat akan bereaksi membentuk ion silikat hidroksida karena pencampuran *waterglass* dengan larutan alkali pada pencampuran tidak langsung, seperti reaksi di bawah ini.



Ion  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{Ca}^{2+}$ , juga terbebaskan pada proses pelarutan ini, terlihat terbentuknya endapan hitam pada permukaan pasta geopolimer yaitu  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  yang merupakan hasil reaksi  $\text{Fe}^{3+}$  dengan  $\text{OH}^-$ , yang terbentuk lebih banyak dibandingkan pada pasta geopolimer KOH. Hal ini juga ditunjukkan oleh data uji XRD dimana intensitas  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , yang lebih rendah pada campuran dibanding KOH.

Tingginya intensitas  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , disebabkan oleh penstabilan struktur dengan pemutusan ikatan Si-O-Al yang meninggalkan Al-OH dan Si-O-Si. Di bawah ini merupakan reaksi yang terjadi saat pelarutan <sup>[2]</sup>.



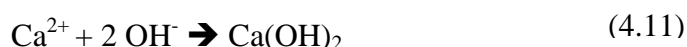
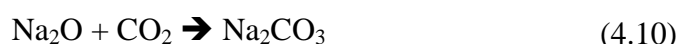
Muatan negatif monomer Al akan distabilkan oleh kation  $\text{Na}^+$ , karena memiliki ukuran molekul yang kecil dibandingkan dengan  $\text{K}^+$ . pemutusan rantai ikatan Si-O-Al akan terus berlanjut selama proses disolusi.

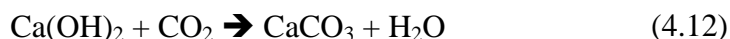
Banyaknya  $\text{OH}^-$ , yang bereaksi dan berikatan dengan Al, sehinggasedikit terlarutnya monomer silikat pembentuk ikatan Si-O-Al amorfus. Dengan kata lain, monomer silikat hanya terlarut sedikit sekali, sebagai pembentuk amorfus Si-O-Al, dimana Si masih berikatan dengan mineralnya yaitu Fe (kandungan unsur tertinggi setelah Si). Hal ini membentuk mineral Fe-O-Si yang sesuai pada data hasil uji XRD, dimana terdapat peak fayalite yang tinggi.

Kation  $\text{K}^+$ , pada sistem ini menstabilkan rantai Si-O yang telah putus dengan Al-OH. Hal ini dikarenakan ukuran molekul Si-O-Fe yang besar, sehingga kation  $\text{K}^+$  mampu menempel (*attach*) pada molekul tersebut. selain itu ion  $\text{K}^+$  yang mampu digantikan oleh  $\text{Ca}^{2+}$ , merupakan makromolekul, yang mampu mengaktifasi pembentukan senyawa Ca-Si-Fe-Al. dalam hal ini, XRD mendeteksi mineral Ca-Si-Fe yang berikatan dengan sedikit Al, membentuk omphacite.

Sedikitnya bentuk amorfus, terlihat dengan tidak terbentuknya peak yang rendah dan melebar. Dengan begitu, peningkatan nilai kuat tekan fleksural pada pasta geopolimer campuran, tidak dibentuk oleh aluminosilikat amorfus melainkan oleh struktur kristalin dari fayalite dan omphacite.

Ion bebas berlebih akan terus bereaksi menjadi stabil, fenomena ini terjadi pada permukaan sampel dimana banyak terbentuk endapan putih. Endapan ini bisa berupa senyawa garam Ca ataupun Na, dengan reaksi di bawah ini <sup>[19]</sup>.





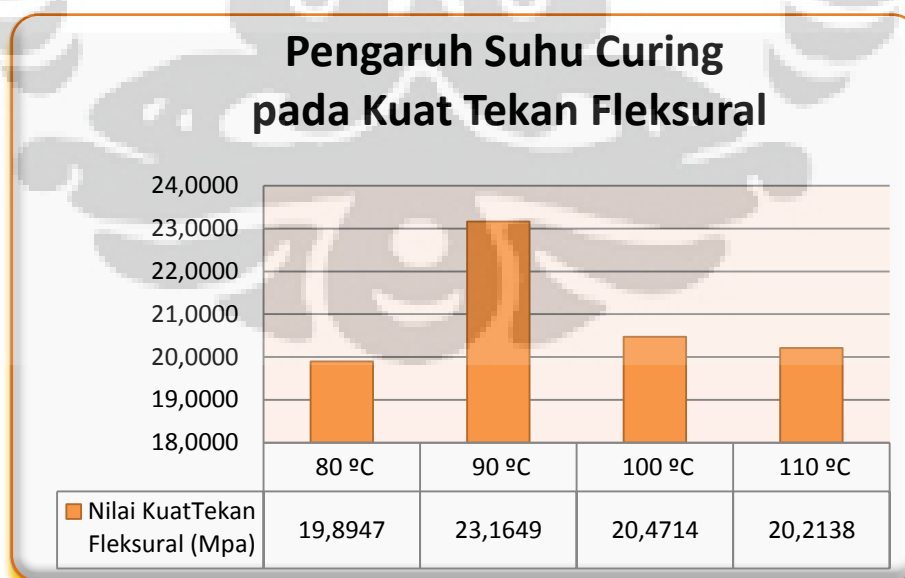
Penguraian natrium hidroksida ini dikatalisasi oleh suhu, dimana reaksi dengan  $\text{CO}_2$  merupakan reaksi spontan dan cepat. Oleh sebab itu, reaksi ini sedikit terjadi pada pasta geopolimer dengan penggunaan KOH sebagai larutan alkali.

Pada prinsipnya, kation-kation  $\text{Na}^+$  dan  $\text{K}^+$  hanyalah penyeimbang muatan dari ion monomer yang terbentuk dari pelarutan. Pelarutan merupakan pemutus rantai ikatan membentuk ion-ion terlarut.

Mineral-mineral Si-O-Al atau Ca-Si-O-Al pada abu terbang akan mengalami pemutusan rantai ikatan oleh  $\text{OH}^-$  pada permukaan partikelnya membentuk monomer-monomer. Proses pelarutan akan berjalan terus hingga terjadi keseimbangan antara kation dan kation pada system pasta geopolimer tersebut.

#### 4.2 Optimasi Suhu Curing

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian kuat tekan fleksural terhadap variabel suhu curing yaitu 80, 90, 100, dan 110<sup>0</sup>C. Formula pasta geopolimer ini menggunakan formulasi pada variabel alkali dengan nilai kekuatan tertinggi yaitu NaOH dengan konsentrasi 8.3M, dengan hasil uji pada grafik di bawah ini.

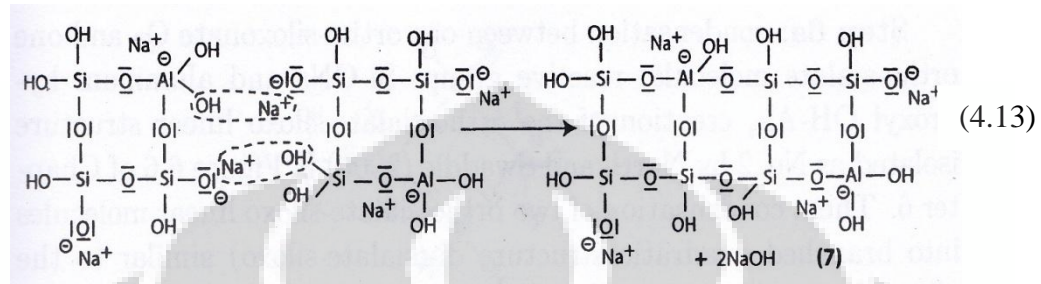


Gambar 4.6. Grafik Pengaruh Suhu *Curing* pada Kuat Tekan Pasta Geopolimer

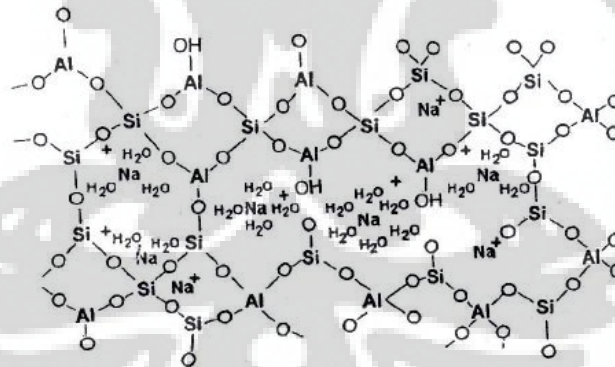




Pembentukan  $\text{OH}^-$  kembali, terlihat pada reaksi polikondensasi monomer Gambar 4.13. Dengan menguapnya  $\text{H}_2\text{O}$ , hal ini mempengaruhi mobilitas ion ketika polikondensasi, dimana kation-kation penyeimbang struktur ini berada dalam media air.



Hal ini mengakibatkan polikondensasi yang tidak optimum, dimana terjadi penurunan kekuatan. Selain itu, hidrat yang sudah berikatan dengan molekul akan menguap. Dengan begitu, akan terjadi mikroporositas pada pasta geopolimer. Duxson menyebutkan bahwa  $\text{H}_2\text{O}$  hasil polikondensasi berada terperangkap pada struktur dan poros<sup>[21]</sup>, seperti ilustrasi pada Gambar 4.7. Cacat poros inilah yang menyebabkan penurunan kekuatan pasta geopolimer.

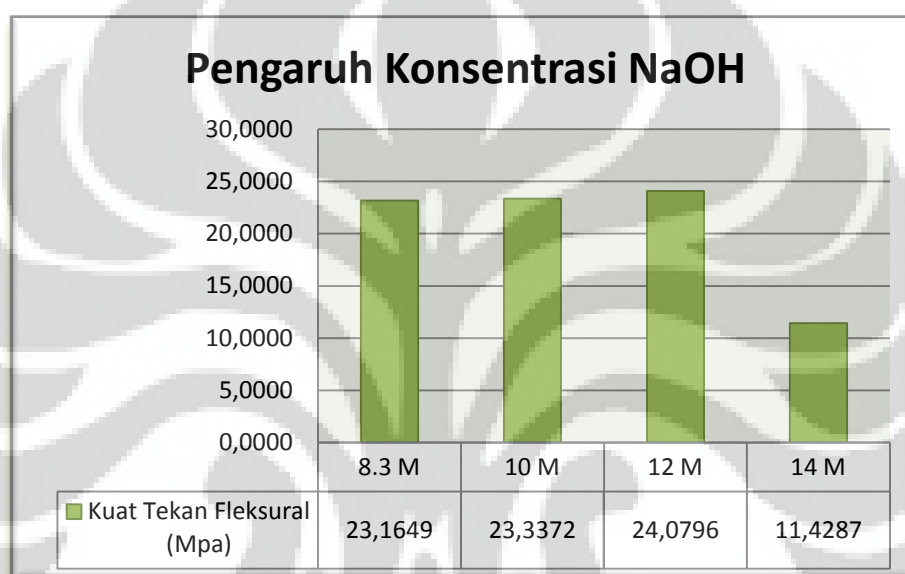


Gambar 4.7 Ilustrasi  $\text{H}_2\text{O}$  yang terperangkap pada struktur mineral<sup>[2]</sup>.

### 4.3 Optimasi Konsentrasi Larutan Alkali

Pada prinsip awal, larutan alkali berfungsi sebagai pelarut partikel abu terbang membentuk ion dan monomer. Ion yang terbentuk merupakan kation alkali yang mudah larut dalam air seperti  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Li}^{2+}$  atau bahkan  $\text{Fe}^{3+}$ .

Pada pembentukan monomer, pemutusan rantai ikatan mineral Si-O-Al oleh OH<sup>-</sup> diawali pada ikatan Si-O. Kemudian, monomer tersebut akan terus bereaksi dengan OH<sup>-</sup> membentuk ion silikat lainnya yang kemudian dilanjutkan oleh pembentukan ion aluminat. Hal ini yang menyebabkan kelarutan Si selalu lebih tinggi dibanding Al. Pada penelitian ini dilakukan optimasi kuat tekan fleksural pada pasta geopolimer dengan penggunaan variasi konsentrasi NaOH yaitu 8,3M, 10M, 12M dan 14M, pada suhu 90<sup>0</sup>C. Hasil uji dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



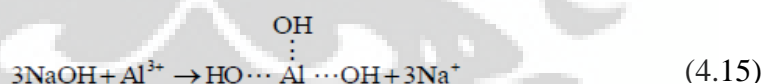
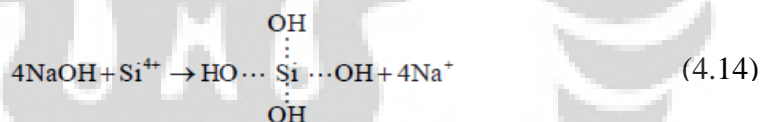
Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Konsentrasi larutan Alkali terhadap Kuat Tekan Fleksural

Melalui perhitungan mol unsur, didapatkan rasio  $M_2O/SiO_2$  yaitu 0.44 pada konsentrasi 12M dengan nilai kuat tekan tertinggi yaitu 24.0796 MPa, dimana M merupakan gabungan Kalium dan Natrium. Di bawah ini merupakan tabel perhitungan rasio  $M_2O/SiO_2$  pada konsentrasi NaOH 12M, dengan contoh perhitungan pada Lampiran 3.

Tabel 4.3 Perhitungan Rasio mol  $M_2O/SiO_2$  pada konsentrasi 12M dan *curing* 90°C

Bahan Baku	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Massa relative (g/mol)	60.09	61.98	94.2
Abu Terbang (g)	60.95	2.13	2.12
Waterglass (g)	13.5	4.0	-
<b>Total (g)</b>	<b>74.45</b>	<b>6.13</b>	<b>2.12</b>
<b>Konsentrasi (mol)</b>	<b>1.24</b>	<b>0.10</b>	<b>0.02</b>
Larutan alkali (mol)	-	0.41780	-
<b>Konsentrasi total (mol)</b>	<b>1.24</b>	<b>0.5178</b>	<b>0,02</b>
<b>Rasio M<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub></b>		<b>0.44</b>	

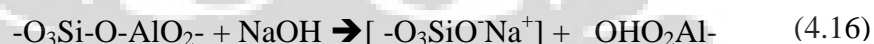
Khale menyebutkan bahwa pemebentukan geopolimer akan efektif pada rasio mol  $M_2O/SiO_2$  dengan rentang 0.2-0.48<sup>[7]</sup>. Hal ini berarti, rasio  $M_2O/SiO_2$  sistem geopolimer sudah terpenuhi. Dengan begitu, kation penyeimbang muatan monomer sudah seharusnya mampu mebuat polimer Si-O-Al optimum pada saat polikondensasi monomer-monomer yang telah terlarutkan oleh OH<sup>-</sup> pada pH tinggi. Di bawah ini merupakan reaksi pelarutan Silika dan Aluminium oleh OH<sup>-</sup><sup>[22]</sup>.



Pelarutan tersebut bisa tidak optimum, bila terdapat sedikit OH<sup>-</sup> yang disebabkan oleh kandungan Silikat dan Aluminat yang tinggi, atau terjadi reaksi OH<sup>-</sup> dengan kation lain, seperti pada Ca<sup>2+</sup> membentuk Ca(OH)<sub>2</sub> dan Fe<sup>3+</sup> membentuk Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Peningkatan konsentrasi menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan fleksural, pada NaOH 8.3M hingga 12M. Hal ini menunjukkan, terjadinya peningkatan pembentukan monomer-monomer aluminat dan silikat pada pH>12. Polikondensasi terjadi dengan pelepasan NaOH kembali, dimana OH-Si berikatan dengan [AlO<sub>4</sub>]<sup>-</sup>Na<sup>+</sup> membentuk Si-O-Al dan melepas NaOH.

NaOH inilah yang kemudian bereaksi kembali dengan udara membentuk  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dan  $\text{CaCO}_3$  berupa endapan putih. Oleh sebab itu, setelah curing permukaan sampel pada pasta geopolimer ini terdapat banyak endapan putih. Hal ini tidak terlalu berpengaruh pada kekuatan pasat geopolimer, karena reaksi terjadi setelah polikondensasi Si-O-Al pada permukaan. Lain halnya dengan  $\text{CaCO}_3$  yang terpresipitasi diantara jarring silang geopolimer, yang mempengaruhi kekuatan geopolimer. Nilai kuat tekan pasta geopolimer menurun hingga lebih 50% pada penggunaan NaOH 14M. Dengan meningkatnya konsentrasi akan meningkatkan pH, dimana pada sampel ini mencapai pH 14. pH yang terlalu tinggi, mampu melarutkan unsur-unsur lain seperti Mn membentuk  $\text{MnO}(\text{OH})_2$  endapan cokelat kemerahan. Oleh sebab itu, solidifikasi pasta geopolimer saat *pre-curing* membutuhkan waktu yang lebih lama. Walaupun pada awal pencampuran, viskositas meningkat dengan meningkatnya konsentrasi, yang disebabkan oleh terbentuknya presipitas gel aluminosilika terlalu dini <sup>[23]</sup>.

Pada prinsip awal, pelarutan dan kondensasi geopolimer terjadi sangat baik dengan peningkatan pH. Dikarenakan pembentukan kembali NaOH saat polikondensasi, menjadikan pasta geopolimer ini terdapat kelebihan  $\text{Na}^+$ . dengan tingginya pH system geopolimer, memicu  $\text{Na}^+$  menstabilkan ionnya dengan berpasangan kembali dengan kation monomer, dengan cara memutuskan rantai jarring silang yang sudah terbentuk. Reaksi terjadi membentuk silikat yang distabilkan oleh  $\text{Na}^+$  dan  $\text{OH}^-$  berikatan pada Al, seperti reaksi di bawah ini.



Oleh karena itu, pada sampel ini tidak terbentuk endapan putih pada permukaan pasta geopolimer, dan meninggalkan media  $\text{H}_2\text{O}$  pada sistem geopolimer yang terlihat basah pada permukaan sampel. Hal inilah yang menyebabkan nilai kuat tekan yang tidak stabil ini dengan fluktuatif tinggi, dikarenakan adanya retakan pada pasta geopolimer dimana terlihat bentuk patahan yang berkontur.

## BAB V

### KESIMPULAN

Dari penelitian pada pasta geopolimer abu terbang kelas F, ditemukan bahwa penggunaan KOH sebagai campuran alkali aktivator bersama dengan *Na-waterglass*, dapat mengurangi kuat tekan fleksural. Campuran alkali aktivator akan optimum pada penggunaan NaOH dengan natrium silikat atau KOH dengan kalium silikat

Kandungan air bebas maupun hidrat (terikat), pada suhu titik didihnya, akan mengalami penguapan sehingga mampu menurunkan kuat tekan fleksural geopolimer.

Kation alkali dan ion  $\text{OH}^-$  berlebih pada geopolimerisasi, akan mengakibatkan pemutusan rantai ikatan molekul.

Pada penelitian ini, didapatkan pasta geopolimer dengan nilai kuat tekan fleksural optimum sebesar 24.0796 MPa, pada kondisi penggunaan NaOH 12M dengan *curing*  $90^{\circ}\text{C}$ . Selain itu, pasta geopolimer memiliki rasio mol Si/Al 2.96 dan rasio  $\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  sebesar 0.44.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Puslitbang Pemukiman.1982.Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia (PUBI-1982).Bandung, Pusat penelitian dan pengembangan pemukiman.
- [2] Davidovits, Joseph.2008.*Geopolymer Chemistry and Application*. France:Institute Geopolimere
- [3] Wardani, Sri Prabandiyani retno.2008.Pemanfaatan Limbah Batubara (*Fly Ash*) untuk Stabilitas Tanah maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan. Semarang: Universitas Dipenogoro.
- [4] Hardjito, Djwantoro dkk.2008.*Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Mortar*.Malaysia:Curtin University of Technology.
- [5] Nawy, Edward G.2001.*Fundamental of High Performance Concrete 2<sup>nd</sup> Edition*. Canada:John&Wiley Sons Inc.
- [6] Davidovits, Joseph.1979.*Polymere Mineral, French Patent Application FR 7922041 and FR 8018970; US Patent 4249386, Mineral polymer*.
- [7] Khale, Divya and Rubina Chaudhary.2007.*Mechanism of Geopolymerization and Factor Influencing Its Development:Review.LLC:Springer Science-Bussiness Media*.
- [8] Davidovits, Joseph.1999, dkk.*Proceeding 2<sup>nd</sup> Internatioanal Conference Geopolymere*.France:Universite de Picarde.
- [9] Muchjidin.2006.Pengendalian Mutu dalam Industri Batubara.Bandung:Institut Teknologi Bandung.
- [10] Bakharev, T., 2005. *Resistance of geopolymer materials to acid attack. Cement and Concrete Research*.
- [11] JGS, Van Jaarsveld, dkk.1997. *The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilise Toxic Metal : Part 1 Theory and Application. Mineral Engineering*.
- [12] Xu, Hua dkk.2002.*Geopolymerization of Multiple Minerals*. Australia: Universuty of Melbourne

- [13] Guo, Xiaolu dkk.2009.*Performance and Mechanism of Alkali-Activated Complex Binder of High-Ca Fly Ash and Other Ca-Bearing Materials*. USA:Tongji University.
- [14] Hermansyah, M Fajar.2008. Pembuatan dan Karakterisasi Beton Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang dan Abu Dasar sebagai Agregat Halus. Depok, Universitas Indonesia
- [15] Skoog, Douglas A. dan Donald M. West.1980.*Principal Instrumental Analysis 2<sup>nd</sup> Edition*.Philadelphia, Saunders College
- [16] Andini, S. dkk.2007.*Coal Fly Ash as Raw Material for The Manufacture of Geopolymer-Based Products*.Italy:Univerta de Federico II.
- [17] Shevla, G.1990.Vogel Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimikro Edisi Ke-lima.Jakarta:PT.Kalman Media Pustaka.
- [18] Winnefeld, Frank dkk.2010.*Assesment of Phase Transformation in Alkali Activated Low and High Calcium Fly Ash in Building Materials*. Switzerland:Laboratory for Concrete and Construction Chemistry.
- [19] Fansuri, Hamzah dkk.2008.*The Effect of Sodium Silicate and Sodium Hydroxide on The Strength of Aggregates Made From Coal Fly Ash Using The Geopolymerization Method*. Indonesia:Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [20] Frantisek, Skvara dkk.2006.*Microstructure of Geopolymer Material Based on Fly Ash*. Czech Republic:Institute of Chemical Technology.
- [21] Duxson, Peter dkk.2005.*Understanding The Relationship between Geopolymer Composition of Microstructure and Mechanical Properties*. Australia:University of Melbourne.



- [22] Fansuri, Hamzah dkk.2008.Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Baku Abu LAYang PLTU Paiton. Surabaya: Institue Teknologi Sepuluh Nopember.
- [23] Somna. Kiatsuda dan Chai Jaturapikal.2001.*NaOH-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature*. Thailand: Univesity of Technology Thanburi.





### Lampiran 1. Data hasil uji XRF bahan baku abu terbang

Di bawah ini merupakan tabel hasil pengujian total unsure pada sampel abu terbang, yang dilakukan dengan instrument XRF di Universitas Sebelas Maret, Jawa Tengah.



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS SEBELAS MARET  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
LABORATORIUM MIPA TERPADU**

Jl. Ir. Sutami 36A, Kentingan, Surakarta, Jawa Tengah 57126

Nama konsumen : Ahmad-lipi lampung  
 Jenis analisis : XRF  
 Aplikasi preparasi : EQUA\_Powder/Mylar  
 Jenis sampel : powder  
 Kode sampel : ahmad\_flyash  
 Nama operator : Candra P  
 Hari/Tanggal analisis : Selasa, 3 April 2012  
 Kontak : Dr. Sayekti W., M.Si (081568455281/081904138090)

Formula	Z	Concentration	Status
SiO <sub>2</sub>	14	36.57%	Fit spectrum
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26	19.26%	Fit spectrum
CaO	20	16.55%	Fit spectrum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13	16.08%	Fit spectrum
MgO	12	4.78%	Fit spectrum
SO <sub>3</sub>	16	1.50%	Fit spectrum
Na <sub>2</sub> O	11	1.28%	Fit spectrum
K <sub>2</sub> O	19	1.27%	Fit spectrum
TiO <sub>2</sub>	22	1.16%	Fit spectrum
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	15	0.50%	Fit spectrum
Cl	17	0.25%	Fit spectrum
MnO	25	0.18%	Fit spectrum
BaO	56	0.17%	Fit spectrum
SrO	38	0.17%	Fit spectrum
ZrO <sub>2</sub>	40	0.06%	Fit spectrum
CoO	27	0.04%	Fit spectrum
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	23	0.03%	Fit spectrum
ZnO	30	0.03%	Fit spectrum
SnO <sub>2</sub>	50	0.02%	Fit spectrum
NiO	28	0.02%	Fit spectrum
CuO	29	0.02%	Fit spectrum

Mengetahui

Kepala Lab Terpadu MIPA UNS

Dr. Sayekti Wahyuningsih, M.Si  
NIP.19711211 199702 2001

Surakarta, 3 April 2012

Operator/Analisis

Candra Purnawan  
NIP. 19781228 2005011001

## Lampiran 2. Perhitungan Rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ pada formula pasta geopolimer.

Perhitungan rasio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  atau Si/Al terdapat pada Tabel 4.2. Rasio merupakan perbandingan perhitungan mol. Contoh perhitungan dapat dilihat di bawah ini.

Tabel 4.2 Perhitungan rasio silica terhadap aluminium

Mineral	Massa atom atau molekul relative (g/mol)	Massa bagian pada abu terbang (g)	Massa bagian pada <i>waterglass</i> (g)	Konsentrasi (mol)	Rasio
$\text{SiO}_2$	60.09	60.95	13.5	1.2390	3.97
$\text{Al}_2\text{O}_3$	85.96	26.80	-	0.3118	
Si	28.09			0.5792	2.96
Al	26.98			0.1957	

### Bobot $\text{SiO}_2$ dalam penimbangan abu terbang

$$\text{Bobot SiO}_2 = \frac{35.67}{100} \times 166,7 \text{ gram} = 60.95 \text{ gram}$$

### Bobot $\text{SiO}_2$ dalam penimbangan *waterglass*

$$\text{Bobot SiO}_2 = \frac{27}{100} \times 50 \text{ gram} = 13.5 \text{ gram}$$

Jadi, bobot total  $\text{SiO}_2 = (60.95 + 13.5) \text{ gram} = 74.45 \text{ gram}$

$$\text{Mol SiO}_2 = \frac{\text{Bobot total SiO}_2}{\text{Mr SiO}_2} = \frac{74.45 \text{ g}}{60.09 \text{ g/mol}} = 1.2390 \text{ mol}$$

### Bobot $\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam penimbangan abu terbang

$$\text{Bobot Al}_2\text{O}_3 = \frac{16.08}{100} \times 166,7 \text{ gram} = 26.80 \text{ gram}$$

$$\text{Mol Al}_2\text{O}_3 = \frac{\text{Bobot total Al}_2\text{O}_3}{\text{Mr Al}_2\text{O}_3} = \frac{26.80 \text{ g}}{85.95 \text{ g/mol}} = 0,3118 \text{ mol}$$

$$\text{Jadi, rasio mol SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{\text{mol SiO}_2}{\text{mol Al}_2\text{O}_3} = \frac{1.2390}{0.3118} = 3.97$$

### Lampiran 3. Perhitungan rasio mol $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ pada konsentrasi NaOH 12M

Perhitungan rasio mol  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  pada sampel pasta geopolimer dengan penggunaan NaOH 12M terdapat pada Tabel 4.3. di bawah ini merupakan contoh perhitungannya.

Tabel 4.5 Perhitungan Rasio mol  $\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$

Bahan Baku	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$
Massa relative (g/mol)	60.09	61.98	94.2
Abu Terbang (g)	60.95	2.13	2.12
Waterglass (g)	13.5	4.0	-
Total (g)	74.45	6.13	2.12
Larutan alkali (mol)		0.41780	
Konsentrasi (mol)	1.24	0.5168	0,02
Rasio $\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$		0.44	

#### Bobot $\text{Na}_2\text{O}$ pada penimbangan abu terbang

$$\text{Bobot Na}_2\text{O} = \frac{1.28}{100} \times 166.7 \text{ gram} = 2.1338 \text{ gram}$$

$$\text{Jadi, mol Na}_2\text{O} = \frac{2.1338 \text{ g}}{61.98 \text{ g/mol}} = 0.0345 \text{ mol}$$

#### Bobot $\text{Na}_2\text{O}$ pada penimbangan waterglass

$$\text{Bobot Na}_2\text{O} = \frac{8}{100} \times 50 \text{ gram} = 4 \text{ gram}$$

$$\text{Jadi, mol Na}_2\text{O} = \frac{4 \text{ g}}{61.98 \text{ g/mol}} = 0.0645 \text{ mol}$$

#### Bobot $\text{Na}_2\text{O}$ pada konsentrasi NaOH

Keterangan, asumsi bj air yaitu 1g/ml atau 1Kg/L, x adalah bobot NaOH dan y adalah bobot air. Total bobot larutan alkali adalah 33 gram, maka :

$$12 \text{ mol/L} = \frac{x}{40 \text{ g/mol}} \times \frac{1000}{y}$$

$$y = 2.0833 x$$

$$y = 69.4264 - 2.0833 y$$

$$y = 22.52$$

bila bobot air adalah 22.52 gram sama dengan 22.52 mL, maka bobot NaOH adalah 10.48 gram.

$$\text{Mol NaOH} = \frac{10.78 \text{ g}}{39.99 \text{ g/mol}} = 0.2696 \text{ mol}$$

$$\text{Mol Na}_2\text{O} = \frac{\text{Mr Na}_2\text{O}}{\text{Mr NaOH}} \times \text{mol NaOH} = \frac{61.98 \text{ g/mol}}{39.99 \text{ g/mol}} \times 0.2696 \text{ mol} = 0.4178 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Total mol Na}_2\text{O pada formula} &= 0.0345 \text{ mol} + 0.0645 \text{ mol} + 0.4178 \text{ mol} \\ &= 0.5168 \text{ mol} \end{aligned}$$

Bobot K<sub>2</sub>O pada penimbangan abu terbang

$$\text{Bobot K}_2\text{O} = \frac{1.27}{100} \times 166.7 \text{ gram} = 2.1171 \text{ gram}$$

$$\text{Jadi, mol Na}_2\text{O} = \frac{2.1171 \text{ g}}{94.2 \text{ g/mol}} = 0.0225 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi, total mol alkali (Na}_2\text{O+K}_2\text{O)} &= 0.5168 \text{ mol} + 0.0225 \text{ mol} \\ &= 0.5423 \text{ mol} \end{aligned}$$

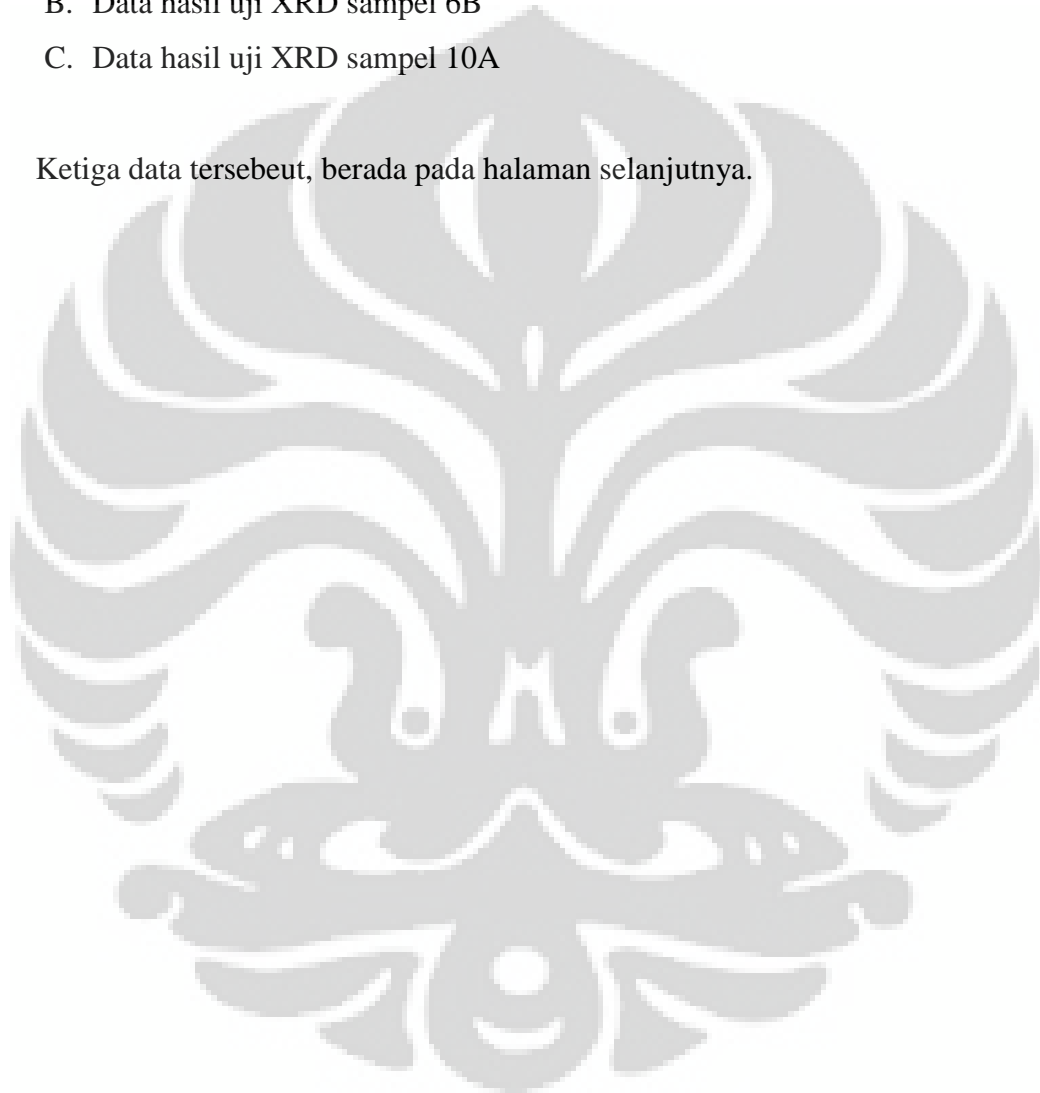
$$\text{Jadi, rasio mol M}_2\text{O/SiO}_2 = \frac{\text{mol alkali}}{\text{mol SiO}_2} = \frac{0.5423 \text{ mol}}{1.2390 \text{ mol}} = 0.4377 \sim 0.44$$

#### **Lampiran 4. Hasil data uji XRD sampel uji pasta geopolimer**

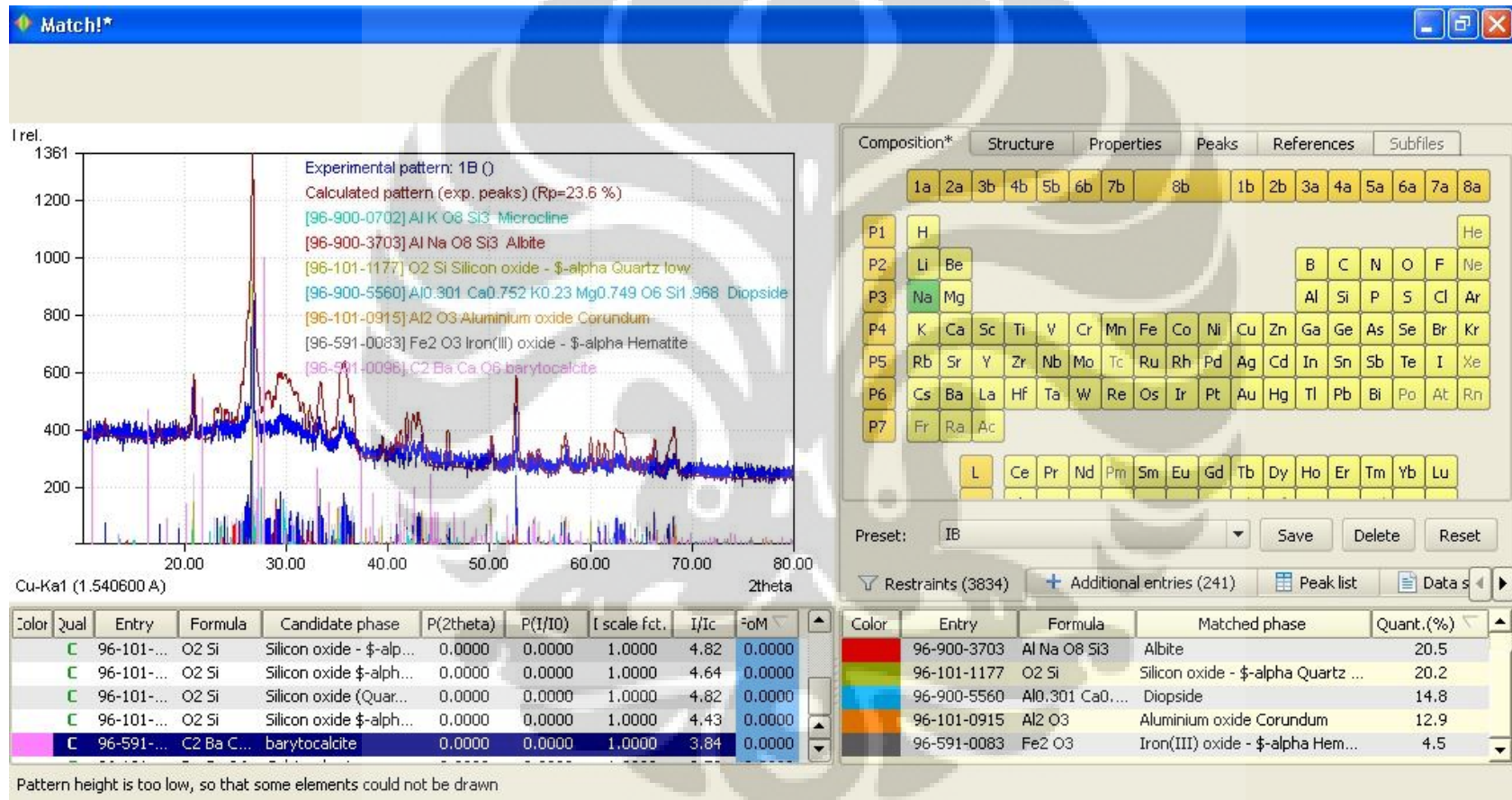
Di bawah ini merupakan data hasil uji XRD pada variabel alkali sampel pasta geopolimer, yang dilakukan di Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah (UIN), Jakarta.

- A. Data hasil uji XRD sampel IB.
- B. Data hasil uji XRD sampel 6B
- C. Data hasil uji XRD sampel 10A

Ketiga data tersebut, berada pada halaman selanjutnya.



A. Hasil analisa mineral XRD sampel KOH menggunakan software 'Match'.





\*\*\* Basic Data Process \*\*\*

Group : 0527  
Data : 1B

# Strongest 3 peaks

no. peak	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)	
1	20	26.6689	3.33991	100	0.17780	530	5075
2	47	52.6218	1.73788	31	0.14210	162	1255
3	12	20.8935	4.24825	21	0.15700	112	1133

# Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	10.4712	8.44152	3	0.15750	18	260
2	11.4880	7.69655	4	0.06400	19	76
3	11.6555	7.58631	4	0.15110	21	281
4	12.7829	6.91965	4	0.16000	19	338
5	14.2378	6.21567	5	0.11560	28	245
6	15.2186	5.81722	6	0.14930	30	336
7	15.7723	5.61422	3	0.12740	18	273
8	17.1600	5.16321	5	0.12000	26	212
9	17.5476	5.05002	4	0.16190	23	238
10	18.0278	4.91658	4	0.05570	22	96
11	20.3037	4.37031	4	0.10750	19	201
12	20.8935	4.24825	21	0.15700	112	1133
13	22.4425	3.95841	3	0.10500	16	121
14	22.8987	3.88057	6	0.11250	30	239
15	23.5265	3.77842	5	0.21970	24	516
16	24.2378	3.66912	5	0.12440	28	235
17	24.6394	3.61022	3	0.09890	17	120
18	25.6005	3.47682	5	0.12900	29	204
19	26.1600	3.40372	9	0.40000	47	1420
20	26.6689	3.33991	100	0.17780	530	5075
21	29.4390	3.03164	11	0.22030	59	810
22	29.9600	2.98009	3	0.14660	16	357
23	31.1483	2.86906	5	0.09670	28	302
24	32.3200	2.76767	4	0.10000	23	180
25	33.2929	2.68898	10	0.22000	52	885
26	33.6728	2.65951	5	0.09430	27	205
27	35.6238	2.51820	14	0.38100	74	2169
28	36.0400	2.49007	5	0.00000	29	0
29	36.5878	2.45403	8	0.45560	44	1238
30	36.9900	2.42827	4	0.16000	22	255
31	38.4625	2.33862	4	0.11500	20	182
32	39.0371	2.30551	3	0.15430	18	174
33	39.5179	2.27856	10	0.13220	51	464
34	40.3525	2.23334	7	0.12500	37	320
35	40.8602	2.20676	10	0.18810	52	726
36	41.8475	2.15695	12	0.15900	61	562
37	42.4968	2.12548	8	0.34790	45	737
38	43.0800	2.09805	8	0.78280	42	1189
39	43.8135	2.06461	6	0.12710	32	196
40	44.2620	2.04472	3	0.15600	17	307
41	45.1000	2.00866	3	0.02000	17	125
42	45.8164	1.97890	8	0.30710	40	1231
43	47.1666	1.92536	5	0.26670	26	1010
44	48.5200	1.87477	5	0.00000	24	0
45	50.1913	1.81619	16	0.15270	85	901
46	50.6712	1.80010	5	0.10250	26	148
47	52.6218	1.73788	31	0.14210	162	1255
48	53.8125	1.70220	5	0.18500	25	407
49	57.0893	1.61203	6	0.20530	33	559

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
50	57.5800	1.59946	4	0.07340	19	338
51	58.9583	1.56531	3	0.14330	16	109
52	59.9925	1.54077	6	0.18500	33	368
53	60.6837	1.52487	5	0.21750	25	365
54	62.4200	1.48656	6	0.20000	30	516
55	63.0643	1.47291	5	0.22470	25	495
56	63.9500	1.45463	4	0.15340	20	244
57	64.9552	1.43453	3	0.12380	16	173
58	66.4600	1.40565	5	0.03060	26	39
59	67.1116	1.39358	3	0.08330	18	133
60	68.2095	1.37380	11	0.20900	60	1002
61	68.5870	1.36716	4	0.20600	21	296
62	69.7391	1.34736	6	0.21170	33	450
63	70.3800	1.33665	5	0.16000	24	448
64	71.5430	1.31776	4	0.25400	22	475
65	72.0340	1.30998	3	0.10300	18	112
66	72.4483	1.30350	4	0.17670	21	300
67	73.2200	1.29166	3	0.15340	16	345
68	75.2460	1.26183	6	0.14000	34	292
69	76.4060	1.24553	3	0.10800	17	123
70	76.8871	1.23894	3	0.23920	18	209
71	77.4220	1.23171	4	0.11600	20	179
72	78.2823	1.22031	3	0.17130	17	271
73	78.8487	1.21296	3	0.17750	18	230
74	79.4650	1.20509	4	0.17000	19	208
75	79.8000	1.20087	4	0.22000	20	284

\*\*\* Basic Data Process \*\*\*

# Data Infomation

Group : 0527  
Data : 1B  
Sample Nmae : 1B  
Comment :  
Date & Time : 05-30-12 15:00:36

# Measurement Condition

X-ray tube

target : Cu  
voltage : 40.0 (kV)  
current : 30.0 (mA)

Slits

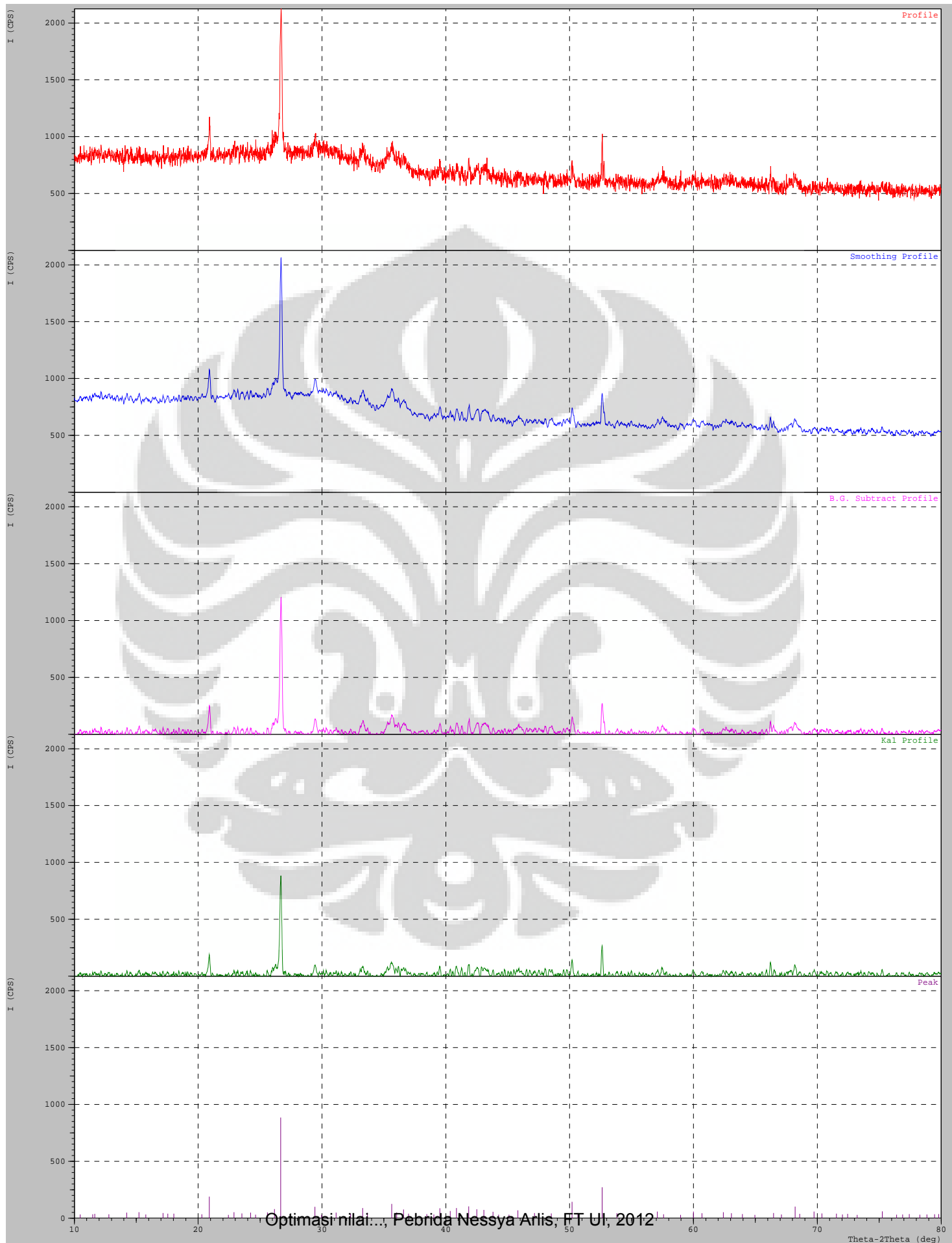
Auto Slit : not Used  
divergence slit : 1.00000 (deg)  
scatter slit : 1.00000 (deg)  
receiving slit : 0.30000(mm)

Scanning

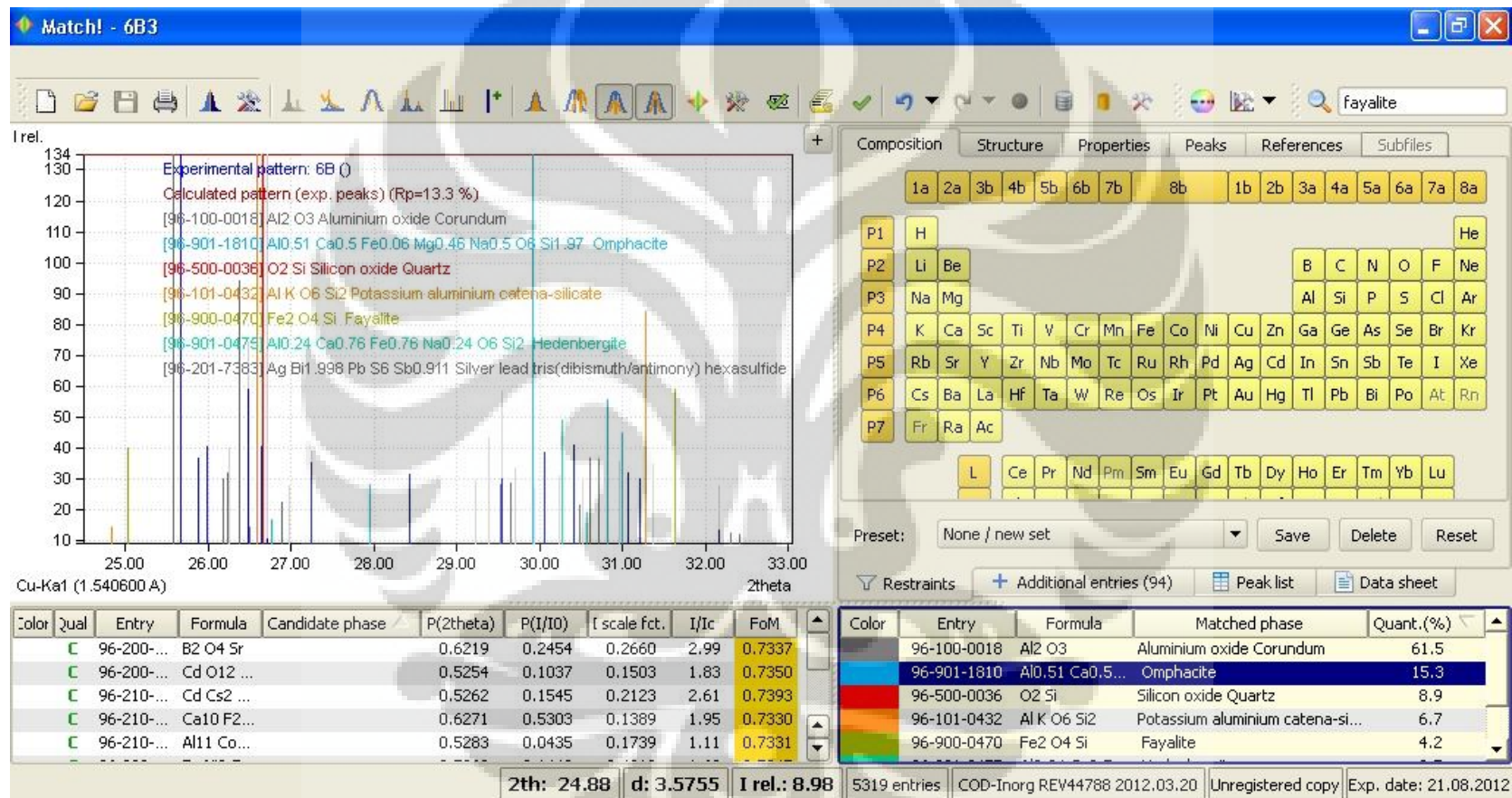
drive axis : Theta-2Theta  
scan range : 10.0000 - 80.0000 (deg)  
scan mode : Continuous Scan  
scan speed : 2.0000 (deg/min)  
sampling pitch : 0.0200 (deg)  
preset time : 0.60 (sec)

# Data Process Condition

Smoothing [ AUTO ]  
smoothing points : 13  
B.G.Subtruction [ AUTO ]  
sampling points : 13  
repeat times : 30  
Kal-a2 Separate [ MANUAL ]  
Kal a2 ratio : 50 (%)  
Peak Search [ MANUAL ]  
differential points : 33  
FWHM threhold : 0.050 (deg)  
intensity threshold : 30 (par mil)  
FWHM ratio (n-1)/n : 2  
System error Correction [ NO ]  
Precise peak Correction [ NO ]



B. Hasil analisa mineral XRD sampel campuran (KOH:NaOH=1:1) menggunakan software 'Match'.



\*\*\* Basic Data Process \*\*\*

Group : 0527  
Data : 6B

# Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	6	35.1434	2.55152	100	0.10460	1394	7557
2	13	52.5397	1.74040	86	0.12440	1200	8349
3	2	25.6078	3.47585	84	0.10620	1166	6541

# Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	20.8570	4.25560	8	0.16740	105	1324
2	25.6078	3.47585	84	0.10620	1166	6541
3	26.6330	3.34433	31	0.17740	426	4620
4	29.4024	3.03533	4	0.24480	60	1258
5	33.2118	2.69536	5	0.17630	68	1103
6	35.1434	2.55152	100	0.10460	1394	7557
7	35.6200	2.51846	4	0.39340	58	2065
8	36.5133	2.45887	4	0.11850	57	583
9	39.4188	2.28406	3	0.26900	47	1028
10	42.9213	2.10544	3	0.10930	43	411
11	43.3619	2.08506	7	0.12200	102	893
12	50.1235	1.81848	4	0.22710	59	832
13	52.5397	1.74040	86	0.12440	1200	8349
14	57.5856	1.59932	3	0.13780	45	592
15	68.1262	1.37528	3	0.22750	47	928
16	76.8816	1.23901	6	0.14670	85	762

\*\*\* Basic Data Process \*\*\*

# Data Infomation

Group : 0527  
Data : 6B  
Sample Nmae : 6B  
Comment :  
Date & Time : 05-30-12 15:41:49

# Measurement Condition

X-ray tube

target : Cu  
voltage : 40.0 (kV)  
current : 30.0 (mA)

Slits

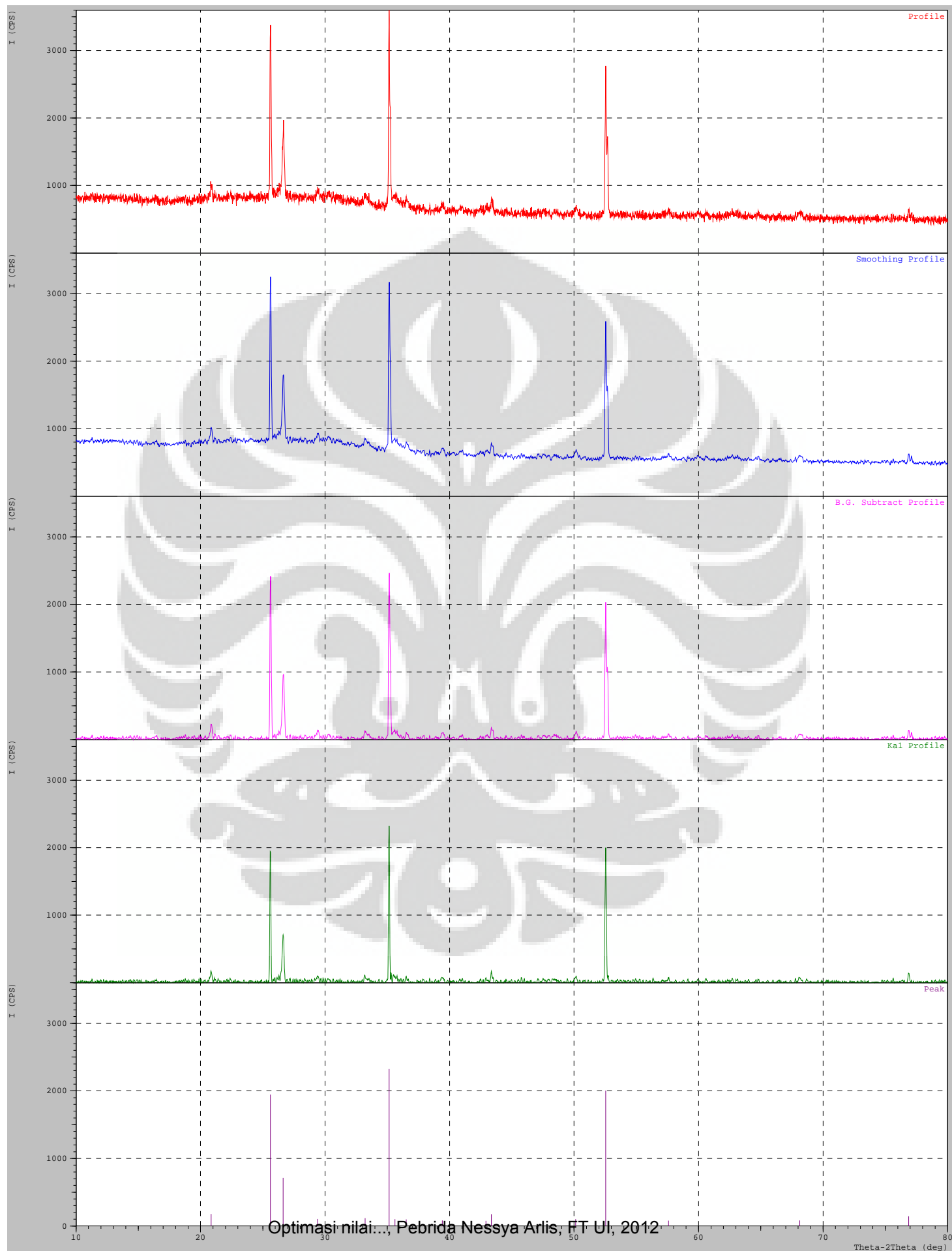
Auto Slit : not Used  
divergence slit : 1.00000 (deg)  
scatter slit : 1.00000 (deg)  
receiving slit : 0.30000(mm)

Scanning

drive axis : Theta-2Theta  
scan range : 10.0000 - 80.0000 (deg)  
scan mode : Continuous Scan  
scan speed : 2.0000 (deg/min)  
sampling pitch : 0.0200 (deg)  
preset time : 0.60 (sec)

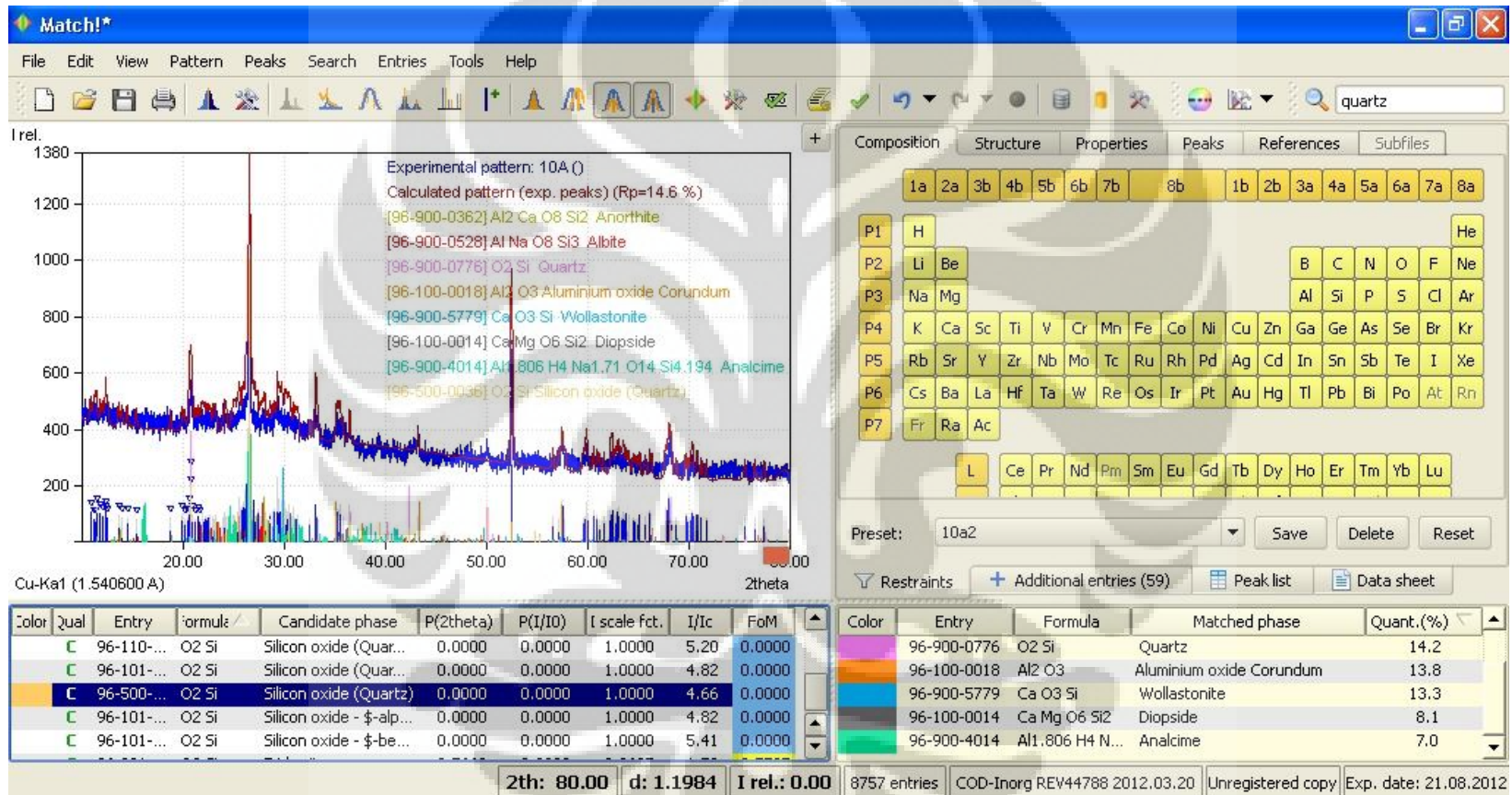
# Data Process Condition

Smoothing [ AUTO ]  
smoothing points : 9  
B.G.Subtruction [ AUTO ]  
sampling points : 9  
repeat times : 30  
Kal-a2 Separate [ MANUAL ]  
Kal a2 ratio : 50 (%)  
Peak Search [ MANUAL ]  
differential points : 33  
FWHM threhold : 0.050 (deg)  
intensity threshold : 30 (par mil)  
FWHM ratio (n-1)/n : 2  
System error Correction [ NO ]  
Precise peak Correction [ NO ]





C. Hasil analisa mineral XRD sampel NaOH menggunakan software 'Match'.



\*\*\* Basic Data Process \*\*\*

Group : 0527  
Data : 10A

# Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	18	26.6597	3.34104	100	0.22830	426	4981
2	51	52.5755	1.73930	81	0.18760	345	3224
3	11	20.8880	4.24936	19	0.25600	83	1227

# Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	10.4385	8.46789	5	0.12290	21	149
2	10.8890	8.11855	6	0.28470	25	405
3	11.5222	7.67378	5	0.19560	20	288
4	12.0695	7.32701	4	0.26900	19	500
5	14.5051	6.10172	4	0.10170	16	182
6	15.4766	5.72082	4	0.15330	18	238
7	16.4750	5.37631	5	0.19000	21	412
8	18.8813	4.69621	6	0.30930	24	593
9	19.4816	4.55284	4	0.11670	17	156
10	20.2607	4.37949	4	0.09860	19	224
11	20.8880	4.24936	19	0.25600	83	1227
12	22.3391	3.97650	4	0.13170	15	269
13	23.3400	3.80819	5	0.16000	21	407
14	24.3533	3.65198	5	0.14670	21	393
15	25.2462	3.52481	4	0.07900	16	148
16	25.6162	3.47473	10	0.24750	41	534
17	26.1000	3.41141	11	0.38000	46	1469
18	26.6597	3.34104	100	0.22830	426	4981
19	27.1218	3.28516	8	0.34030	34	814
20	27.9205	3.19297	7	0.10110	30	348
21	28.6773	3.11041	4	0.21870	19	450
22	29.4343	3.03211	16	0.26280	67	1309
23	30.1690	2.95992	8	0.24600	34	609
24	30.6375	2.91572	5	0.27500	20	374
25	31.0710	2.87602	7	0.20600	29	317
26	31.4463	2.84255	6	0.09930	26	179
27	33.2328	2.69371	12	0.25430	49	1065
28	35.2800	2.54195	12	0.33500	50	804
29	35.6400	2.51709	14	0.75120	61	1424
30	36.0400	2.49007	6	0.00000	25	0
31	36.5857	2.45417	13	0.22860	56	1291
32	37.4950	2.39672	4	0.19000	15	244
33	37.8475	2.37520	5	0.18500	20	151
34	38.3949	2.34259	4	0.27420	16	342
35	39.4900	2.28011	9	0.26000	38	683
36	40.2813	2.23712	7	0.17070	31	313
37	40.8807	2.20570	9	0.14140	37	406
38	42.5314	2.12383	7	0.21710	30	402
39	42.9600	2.10363	9	0.26860	40	527
40	43.3194	2.08701	13	0.27310	55	823
41	44.0476	2.05418	6	0.12870	25	177
42	44.6700	2.02699	5	0.22000	20	273
43	45.1762	2.00545	4	0.13250	15	102
44	45.8320	1.97827	6	0.28000	26	470
45	48.9186	1.86042	6	0.13070	25	250
46	49.5325	1.83879	4	0.29500	16	335
47	50.1525	1.81750	11	0.26500	48	775
48	51.2671	1.78057	5	0.12290	23	161
49	51.6125	1.76947	4	0.16500	15	129

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
50	52.0985	1.75410	4	0.15710	18	149
51	52.5755	1.73930	81	0.18760	345	3224
52	53.6980	1.70556	5	0.13200	22	181
53	54.1916	1.69118	4	0.13670	19	197
54	55.2200	1.66210	3	0.08000	14	120
55	57.5335	1.60064	14	0.35800	58	1670
56	58.6025	1.57396	3	0.06910	14	85
57	59.9996	1.54061	12	0.21270	49	699
58	60.6800	1.52495	7	0.20000	31	579
59	61.7012	1.50214	5	0.17250	22	275
60	62.5528	1.48372	8	0.53430	35	890
61	63.0928	1.47232	7	0.25430	29	413
62	63.6800	1.46015	4	0.16000	15	331
63	64.6460	1.44064	5	0.18210	23	374
64	65.7775	1.41858	4	0.21500	19	282
65	66.2375	1.40983	5	0.14500	21	249
66	67.7400	1.38217	6	0.18000	27	437
67	68.1850	1.37423	19	0.27400	81	1432
68	68.8800	1.36205	3	0.00000	14	0
69	69.8400	1.34566	5	0.16000	23	256
70	70.4450	1.33558	7	0.20340	29	306
71	70.8950	1.32820	7	0.23000	28	301
72	71.3854	1.32028	7	0.13580	29	227
73	72.8683	1.29702	3	0.08330	14	78
74	74.1336	1.27799	4	0.10070	16	93
75	74.7604	1.26882	3	0.16580	14	186
76	77.5605	1.22985	3	0.20900	13	179
77	78.0975	1.22273	3	0.07500	13	112
78	78.7740	1.21392	3	0.10800	13	89
79	79.8562	1.20017	3	0.10100	14	112

\*\*\* Basic Data Process \*\*\*

# Data Infomation

Group : 0527  
Data : 10A  
Sample Nmae : 10A  
Comment :  
Date & Time : 05-31-12 08:02:59

# Measurement Condition

X-ray tube

target : Cu  
voltage : 40.0 (kV)  
current : 30.0 (mA)

Slits

Auto Slit : not Used  
divergence slit : 1.00000 (deg)  
scatter slit : 1.00000 (deg)  
receiving slit : 0.30000(mm)

Scanning

drive axis : Theta-2Theta  
scan range : 10.0000 - 80.0000 (deg)  
scan mode : Continuous Scan  
scan speed : 2.0000 (deg/min)  
sampling pitch : 0.0200 (deg)  
preset time : 0.60 (sec)

# Data Process Condition

Smoothing [ AUTO ]  
smoothing points : 17  
B.G.Subtruction [ AUTO ]  
sampling points : 17  
repeat times : 30  
Kal-a2 Separate [ MANUAL ]  
Kal a2 ratio : 50 (%)  
Peak Search [ MANUAL ]  
differential points : 33  
FWHM threhold : 0.050 (deg)  
intensity threshold : 30 (par mil)  
FWHM ratio (n-1)/n : 2  
System error Correction [ NO ]  
Precise peak Correction [ NO ]

