



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENGOTOR CaO DAN MgO PADA ABU
TERBANG SINTETIK SEBAGAI PREKURSOR
GEOPOLIMER**

SKRIPSI

**KENNEDI
0706268644**

**DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JULI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENGOTOR CaO DAN MgO PADA ABU
TERBANG SINTETIK SEBAGAI PREKURSOR
GEOPOLIMER**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik (ST)**

**KENNEDI
0706268644**

**DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPOK
JULI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : KENNEDI
NPM : 0706268644
Tanda Tangan :



Tanggal : 11 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Kennedy
NPM : 0706268644
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Pengotor CaO dan MgO pada Abu Terbang Sintetik Sebagai Prekursor Geopolimer

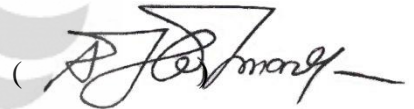
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng



Penguji I : Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono M.Phil.Eng



Penguji II : Dr. Ir. Sri Harjanto



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 11 Juli 2011

KATA PENGANTAR

Berkah dan kasih karunia Tuhan yang begitu hangat dan sejuk yang selalu menyertai dan memberi saya kekuatan juga inspirasi yang menyenangkan dalam menyelesaikan sebuah tugas terberat dalam jenjang pendidikan kesarjanaan. Sebagian dari ilmu dari pengembanan tugas tersebut yang sempat singgah di otak kecil saya ini, saya torehkan dalam sebuah tulisan sederhana yang berjudul **Pengaruh Pengotor CaO dan MgO pada Abu Terbang Sintetik Sebagai Prekursor Geopolimer** dengan segala kekurangan didalamnya.

Jika ada ucapan yang lebih tinggi lagi dari terima kasih mungkin itu yang pantas saya ucapkan dengan segala kerendahan hati untuk :

1. Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng. atas kesediaan beliau menjadi pembimbing tugas akhir.
2. Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono M.Phil.Eng dan Dr. Ir. Sri Harjanto atas kesedian beliau menjadi penguji tugas akhir.
3. Umar Sidik yang menjadi rekanan dalam pengerjaan tugas akhir.
4. Rekanan akademisi yang turut campur tangan dalam penyelesaian tugas akhir.
5. Mendiang Izumi Sakai atas semua lagu yang menemani saya dalam menulis tulisan ini.

Seburuk-buruknya tulisan ini dibuat semoga ada setitik manfaat yang dapat diekstrak baik dari segi akademis atau dari segimanapun tulisan ini dipahami.

Depok, 11 Juli 2011

Penulis

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

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

Nama : Kennedy
NPM : 0706268644
Program Studi : Sarjana
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**PENGARUH PENGOTOR CaO DAN MgO PADA ABU TERBANG
SINTETIK SEBAGAI PREKURSOR**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 11 Juli 2011

Yang menyatakan



(Kennedi)

ABSTRAK

Nama : Kennedi
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : **Pengaruh Pengotor CaO dan MgO pada Abu Terbang Sintetik Sebagai Prekursor Geopolimer**

Geopolimer sebagai semen generasi baru, yang diharapkan dapat mengurangi produksi semen *portland* sehingga dapat menekan polusi CO₂ dari produksi semen *portland*. Geopolimer dapat dibuat dari beberapa prekursor seperti dari metakaolin, abu terbang dan *blast furnace slag*. Studi terhadap beberapa prekursor, terutama dari komposisi kimia dibutuhkan untuk mengetahui variabel yang mempengaruhi sifat dari geopolimer. Dalam penelitian ini, untuk melihat pengaruh pengotor CaO dan MgO dalam prekursor abu terbang, dibuat prekursor sintetik dengan komposisi yang sesuai dengan abu terbang. Sintesis dilakukan dengan membuat prekursor tanpa pengotor SiO₂ dan Al₂O₃ sebagai pembanding dan prekursor yang diberi tambahan pengotor CaO dan MgO. Campuran tersebut dilakukan *melt-quench* untuk mendapatkan struktur gelas pada daerah *liquid immiscibility metastable*. Kemudian dilakukan pembandingan hasil pengujian XRD dan disimpulkan pengotor CaO dan MgO menghasilkan prekursor dengan struktur gelas yang lebih baik.. Prekursor kemudian dibuat geopolimer dengan mereaksikannya dalam medium alkali dan menghasilkan spesies dengan komposisi yang sama dengan zeolit dengan struktur amorf. Selain itu juga memperlihatkan geopolimer dengan penambahan pengotor CaO dan MgO dapat meningkatkan nilai kuat tekan dari geopolimer.

Kata kunci :

Geopolimer, Prekursor Geopolimer, Abu terbang, Abu terbang sintetik, Gelas, *immiscibility*, *Melt-quench*

ABSTRACT

Name : Kennedi
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : **Effect of CaO and MgO Impurities on Synthetic Fly Ash as a Geopolymer Precursor**

Geopolymer is a new generation of the cement materials, and it can be reduce ordinary Portland cement production and reduce CO₂ pollution because Portland cements production. Geopolymer made from some precursor like metakaolin, fly ash and blast furnace slag. Study of the precursor, especially from chemical composition, is necessary to know the variable that affecting the geopolymer properties. In this research, to know the effect of contamination of CaO and MgO in fly ash precursor made synthetic precursor with fly ash composition. The synthesis of fly ash without contamination is made to compare the precursor with CaO and MgO contamination. Those mixtures are melt-quenched liquid immiscibility metastable to get glassy structure. And comparing the result from XRD characterization that precursor with CaO and MgO contaminant more glassy structure of precursor. Precursor then made the geopolymer by reacted with alkali medium and result the product is same composition of zeolite material but amorphous structure. Beside that geopolymer with CaO dan MgO contaminant increase the compressive strength of geopolymer.

Keywords:

Geopolymer, Precursor Geopolymer, Fly ash, Fly ash Synthetic, Glass, immiscibility, melt-quench

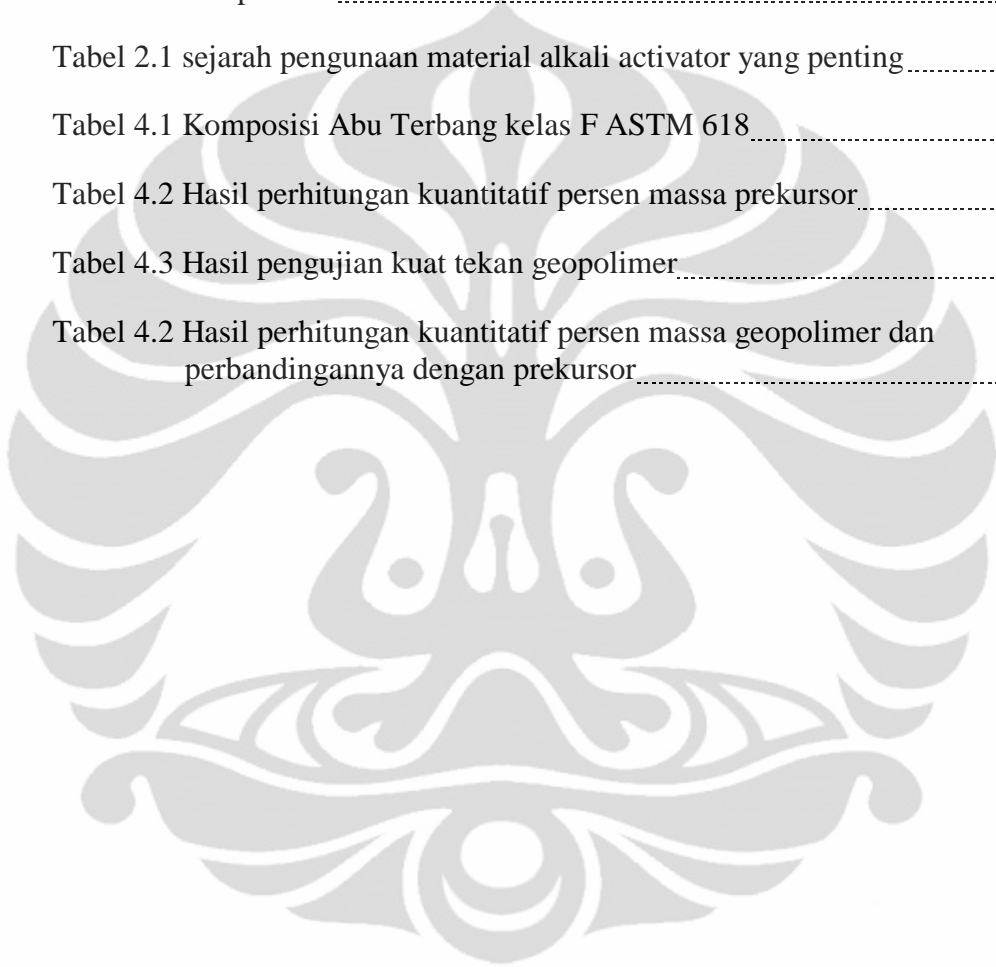
DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	6
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	6
1.5 Sistematika Penulisan.....	7
BAB II.....	8
DASAR TEORI	8
2.1 Terminologi Geopolimer	8
2.2 Prekursor Aluminosilikat.....	12
2.3 Material Alkali-Activated.....	15
2.4 Pengaruh Ca dan Mg	17
2.5 Kestabilan Fasa dan Transisi Gelas.....	21

BAB III.....	28
METODOLOGI PENELITIAN.....	28
3.1 Diagram Alir.....	28
3.2 Alat dan Bahan	30
3.3 Sintesis Prekursor	31
a. Pembuatan cetakan gipsum dan pencetakan <i>slip-casting</i>	31
b. Pencampuran SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO.....	31
c. Sintering	32
d. Melt-quench.....	33
3.4 Pembuatan geopolimer	34
3.5 Pengujian XRD.....	34
3.6 Pengujian Kuat Tekan	36
BAB IV	37
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Pengujian Sampel Bahan.....	37
4.2 Pengujian Prekursor.....	38
a. Pengujian XRD Prekursor.....	38
b. Perhitungan Kuantitatif Prekursor.....	42
4.3 Pengujian Geopolimer	43
a. Pengujian Kuat Tekan Geopolimer	44
b. Pengujian XRD Geopolimer.....	45
c. Perhitungan Kuantitatif Geopolimer.....	49
BAB V.....	51
KESIMPULAN	51
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Aplikasi geopolimer dari tingkat rigiditas rantai dan panjang rantai molekulnya	2
Tabel 1.2. Perbandingan pada manufaktur Portland cement dengan semen Geopolimer	3
Tabel 2.1 sejarah penggunaan material alkali activator yang penting	18
Tabel 4.1 Komposisi Abu Terbang kelas F ASTM 618	39
Tabel 4.2 Hasil perhitungan kuantitatif persen massa prekursor	43
Tabel 4.3 Hasil pengujian kuat tekan geopolimer	49
Tabel 4.2 Hasil perhitungan kuantitatif persen massa geopolimer dan perbandingannya dengan prekursor	50



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Perbandingan test CARBUNCULUS cement™ vs. Portland cement Weight loss dalam larutan asam sulfur	4
Gambar 1.2 Prediksi seberapa lama komposit dapat menahan panas samapi terbakar (fire test ISO 9705).....	5
Gambar 2.1 katan kovalen pada geopolimer	10
Gambar 2.2 Tahapan reaksi aluminosilikat pada medium alkali	11
Gambar 2.3 pelepasan molekul air dan membetuk rantai ikatan kovalen tiga dimensi	12
Gambar 2.4 diagram perbandingan pembentukan rantai dengan konsentrasi sodium silikat terlarut.....	13
Gambar 2.5 (a). Gambar SEM dari GGBFS dengan bentuk yang tidak beraturan	16
Gambar 2.5 (b). Gambar SEM dari abu terbang kelas F yang berbentuk bulat dari Gladstone power station, Australia.....	16
Gambar 2.7 struktur dari geopolimer berbasis sodium-polisialat (Na-PS) dan berbasis potassium-polisialat.....	19
Gambar 2.8 diagram pseudo-ternary dari komposisi abu terbang juga GGBFS yang memperlihatkan kekuatan dari geopolymer.....	22
Gambar 2.9 kation Ca^{2+} dan Na^+ sebagai network modifier putus dan keluar dari permukaan kemudian mendorong silikon untuk membentuk NBO dengan OH membentuk siloxol.....	23
Gambar 2.10 Digram fasa ideal sistem $SiO_2 - Al_2O_3$	24
Gambar 2.11 diagram daerah <i>immiscibility</i> material silikat.....	25
Gambar 2.12 Daerah liquid metastable immiscibility sistem $SiO_2 - Al_2O_3$	26
Gambar 2.13 Diagram TTT Volume Vs Temperatur dari <i>liquid</i> yang membntuk struktur gelas dan kristalin temperature transisi gelas T_g tergantung pada laju pendinginannya	27
Gambar 2.14 Diagram ternary pada sistem $SiO_2 - Al_2O_3 - CaO$	28
Gambar 2.15 Diagram ternary pada sistem $SiO_2 - Al_2O_3 - MgO$	29
Gambar 3.1 diagram alir penelitian	31

Gambar 3.2 skema penyerapan air pada dinding kapiler dari cetakan gipsum	33
Gambar 3.3 Mekanisme sintering	35
Gambar 3.4 instrumen XRD	37
Gambar 4.1 Hasil pengujian XRD sampel SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO dan MgO	38
Gambar 4.2 (a) droplet bening	39
(b) droplet agak buram	39
(c) droplet buram	39
(d) droplet hitam	39
Gambar 4.3 Hasil pengujian XRD prekursor	
(a) tanpa kandungan pengotor	41
(b) dengan tambahan pengotor CaO	41
(c) dengan tambahan pengotor Mg	41
Gambar 4.4 Perbandingan hasil XRD prekursor tanpa pengotor, dengan pengotor CaO dan prekursor dengan pengotor MgO	42
Gambar 4.5 Perubahan posisi puncak lembah pada prekursor dan setelah direaksikan dalam medium alkali	46
Gambar 4.6 Perbandingan pengujian XRD dengan waktu <i>curing</i> 2 jam dan 24 jam yang menghasilkan pola puncak lembah pada kisaran posisi yang sama dan menunjukkan spesies zeolit yang sejenis	47
Gambar 4.7 Hasil Pengujian XRD pada sampel geopolimer	48

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65:35] bening.....	55
Lampiran 2. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65:35] buram.....	55
Lampiran 3. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ [60:33:7] bening.....	56
Lampiran 4. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ [60:33:7] bening.....	56
Lampiran 5. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ MgO}$ [65:33:2] bening.....	57
Lampiran 6. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ MgO}$ [65:33:2] buram.....	57
Lampiran 7. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65:35] amorf.....	58
Lampiran 8. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65:35] semikristalin.....	58
Lampiran 9. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ [60:33:7] amorf.....	59
Lampiran 10. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ [65:33:2] amorf.....	59
Lampiran 11. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ [65:33:2] kristalin.....	60

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Potensi geopolimer sebagai material teknik sebagai material alternatif bahkan dapat dijadikan substitusi untuk beberapa aplikasi. Beberapa sifat material geopolimer yaitu memiliki *formability* yang setara dengan epoxy, ketahanan panas yang sebanding dengan *ceramic oxide* dan kekuatan tekan yang sangat tinggi seperti *Portland cement concrete*. Tabel 1.1 menunjukkan aplikasi geopolimer digambarkan dari tingkat rigiditas rantai tiga dimensinya karena sifat geopolimer ditentukan dari tingkat rigiditasnya^[1]. Dan tingkat rigiditas dari geopolimer dapat dilihat dari rasio Si:Al. pada Si:Al dengan rasio kecil antara 1-3 akan menghasilkan rantai tiga dimensi yang sangat rapat dan sangat rigid. Sedangkan rasio dari Si:Al yang lebih dari 15 akan memberikan sifat polymeric karena rantai yang terbentuk hampir menyerupai rantai dua dimensi. Penggunaan geopolimer dalam fungsi aplikasinya sebagian besar dibagi menjadi tiga yaitu dipakai dalam bentuk *pure*, *filler* dan *reinforce*. Dalam bentuk *pure* dipakai sebagai tempat limbah berbahaya dan radioaktif, sebagai *filler* digunakan sebagai material pengisi beton dan dan fungsi *reinforce* dalam pembuatan cetakan dan *tooling* dalam pengecoran paduan aluminium. Aplikasi ini dipakai dalam bidang otomotif dan penerbangan, pengecoran metalurgi dan *non-ferrous*, teknik sipil, industry plastik.

a. Campuran dan pengganti *Portland cement*

Pada proses produksi semen konstruksi atau lebih dikenal dengan *Portland cement*, paling tidak diperlukan suhu untuk mencapai temperatur proses kalsinasi dari kalsium karbonat pada 1450-1500°C. dengan persamaan reaksi.



Yang berarti dalam 1 ton kalsium karbonat yang dikalsinasi berarti akan menghamburkan 1 ton gas CO₂ ke atmosfer^[2]. Sebuah alternatif baru, yaitu penggunaan semen geopolimer merupakan sebuah tindakan konservatif yang ramah lingkungan untuk menekan polusi gas CO₂. Semen Geopolimer dapat

dipakai sebagai binder layaknya *Portland cement* dan dapat dijadikan campuran dalam membuat beton. keunggulan dari semen geopolimer yaitu

Tabel 1.1 Aplikasi geopolimer dari tingkat rigiditas rantai dan panjang rantai molekulnya [1].

Si:Al ratio	Polymeric Character	Application	
		Low technology	High technology
Si:Al=1:1	3D Network	- Tiles - Ceramics - Fire Protection	
Si:Al=2:1		- Cements - Concretes - Radioactive	
Si:Al=3:1	2D Crosslink	- Foundry Equipment - Fire resistant fiberglass composite	- Tooling for aeronautics - Heat resistant composite
Si:Al>3:1		- Sealant for industry	- Tooling for aeronautics
20:1<Si:Al and Si:Al>35:1			- Fire and heat resistant fiber composite

sifatnya yang lebih cepat keras dibandingkan dengan *Portland cement* sehingga semen geopolimer ini dapat dipakai untuk perbaikan infrastruktur seperti pada perbaikan landasan terbang. Semen geopolimer ini dapat menambal jalur yang rusak dan mengering dalam 4-6 jam (Pyrament®) dibandingkan *Portland cement* yang butuh beberapa hari untuk mengeras sempurna.

Untuk mengkonversi sebuah manufaktur *Portland cement* menjadi sebuah manufaktur semen geopolimer tidak perlu terlalu dibutuhkan untuk mengganti alat yang sudah ada. Karena dapat dipakai crusher, grinder dan oven yang sama pada manufaktur sebelumnya, bahkan dalam produksi semen Geopolimer hanya dibutuhkan suhu setengah dari kalsinasi kalsium karbonat yaitu 750⁰C. sehingga dapat menghemat bahan bakar sekitar 70%. Dalam artian gas buangan dari bahan bakar dapat juga ditekan. Pada proses kimia produksi geopolimer sama sekali tidak mengemisikan gas CO₂, estimasi emisi gas CO₂ dari manufaktur semen geopolimer lebih rendah 80-90% dibanding manufaktur *Portland cement* [2].

GEOCISTEM (GEOpolymeric Cements for Innocuous Stabilization of Toxic EleMents) mengembangkan tiga jenis semen geopolimer yaitu *glass cement*

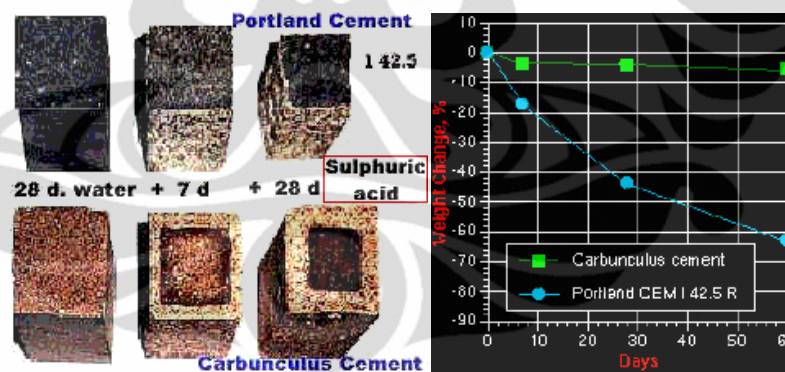
dan dua jenis CARBUNCULUS cements™. Tabel 1.2. Membandingkan antara ketiga semen geopolimer tersebut dengan *Portland cement*.

Tabel 1.2. Perbandingan pada manufaktur *Portland cement* dengan semen Geopolimer [2].

Cement type	Manufacturing temperature	Energy consumption	CO ₂ emission
Portland	1450-1500°C	100	100
Glass	750°C-1350°C	64 (-36%)	35 (-65%)
Carbunculus™	750-800°C	40 (-60%)	20 (-80%)
Carbunculus™	nat. 20-80°C	30 (-70%)	10 (-90%)

b. Sistem isolasi limbah berbahaya dan radioaktif

Endapan lumpur yang mengandung *radionuclide*, logam berat, dan senyawa hidrokarbon dapat dapat mengeras dalam penyimpanan berbasis material geopolimer yang memiliki ketahanan struktural, ketahanan kimia dan mikroba dalam jangka panjang^[3]. Pengujian geopolimer dilakukan dengan pengujian *leaching* pada pH rendah dengan asam sulfat dengan melihat tingkat difusi dari limbah pada dinding geopolimer. Gambar 1.1 menunjukkan perbandingan ketahanan kimia antara semen geopolimer dengan *Portland cement*.



Gambar 1.1 Perbandingan test CARBUNCULUS cement™ vs. Portland cement Weight loss dalam larutan asam sulfur [2].

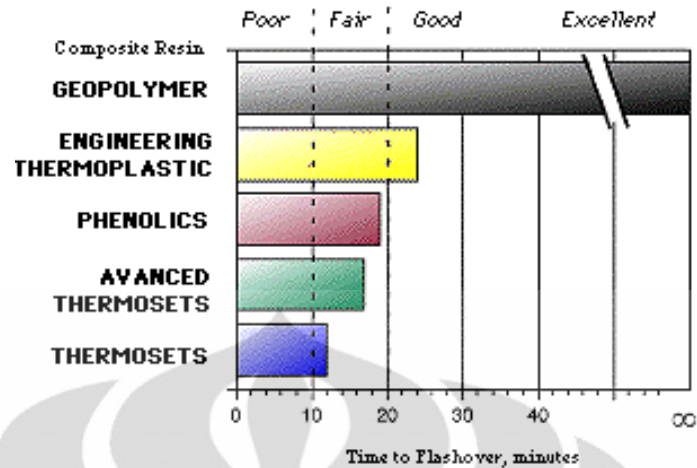
c. Komposit berbasis geopolimer untuk industri penerbangan dan infrastruktur

Sifat utama dari *geo-composite* yaitu ketahanan panas dan api yang sangat baik. Geopolimer komposit memiliki beberapa keunggulan utama dibanding *ceramic-matrix composite*, plastik dan komposit organik lainnya yaitu:

1. geopolimer mudah dibentuk dan tidak membutuhkan suhu tinggi,
2. geopolimer memiliki ketahanan panas yang tinggi dibandingkan komposit organik lainnya
3. geopolimer memiliki sifat mekanik yang lebih baik dan juga tahan terhadap pelarut organik.

Komposit geopolimer atau lebih dikenal dengan *geo-composite* sudah digunakan pada beberapa aplikasi penerbangan seperti pada bagian kabin. Material yang digunakan sebagai material tahan api pada saat pesawat terbang mengalami kecelakaan yaitu material yang mampu menahan panas sebesar 50 kW/m^2 [4]. Material ini diharapkan mencegah kabin kapal ikut terbakar. Selain itu *geo-composite* dinilai cukup murah yaitu sekitar \$4-6 setiap Kg [5]. Gambar 1.2. Menunjukkan material yang biasa dipakai pada bagian kabin yaitu carbon-reinforced polyester, vinylester, epoxy dan material thermoplastik lainnya yang akan terbakar dan menimbulkan asap saat terbakar. Sedangkan komposit berbasis geopolimer dengan penguat karbon fiber tidak akan terbakar apalagi berasap saat terjadi kecelakaan pesawat.

Aplikasi *geo-composite* pada infrastruktur sudah diimplementasikan di negara Jepang untuk pembuatan kolom-kolom beton pada *underway*. Penguat geopolimer pada beton lebih tahan terhadap gempa dan badai. Juga pada infrastruktur yang mempertimbangkan ketahanan api yang tinggi seperti offshore oil platforms, infrastruktur militer dan transportasi publik. Selain itu kelebihan dari *geo-composite* yaitu memiliki kekuatan dan kekakuan spesifik dan memiliki ketahanan korosi dibandingkan beton dengan penguat baja [6].



Gambar 1. 2 Prediksi komposit dapat menaham panas sampai terbakar (fire test ISO 9705) [4].

1.2 Perumusan Masalah

Semakin meningkatnya penelitian mengenai material mengenai geopolimer sebagai material teknik, semakin banyak pula penelitian material aluminosilikat sebagai bahan dasar pembuatan geopolimer. Dari sekian banyak kandidat yang diajukan sebagai bahan dasar atau prekursor untuk geopolimer hanya beberapa material aluminosilikat yang diperhitungkan karena memiliki beberapa kelebihan, reaktivitas dan dayagunanya. Seperti prekursor dari metakaolin hasil kalsinasi dari mineral kaolin, abu terbang dari produk samping dari pembakaran batubara dan *slag* dari *blast furnace* dari produk samping pengolahan besi.

Dari beberapa prekursor yang potensial tersebut hal yang paling berpengaruh dalam reaktivitas dan dayagunanya yaitu komposisi kimia dan juga sifat dari partikel dari masing-masing prekursor untuk mendapatkan formulasi geopolimer yang dapat diimplementasikan secara masal dalam industri. Kunci yang paling vital untuk mendisain sebuah prekursor untuk geopolimer yaitu peranan kation *network-modifier*^[7] (alkali dan alkali tanah) dan struktur gelas dari alumina yang dinilai ideal dalam reaksi geopolimerisasi^[8]. Sedangkan jenis prekursor geopolimer dengan struktur kristalin yang tinggi cenderung kurang reaktif dalam medium alkali. Karena dalam merekayasa sifat dari dari material geopolimer ini dilakukan dari proses pembuatannya atau rektivitasnya dalam medium alkali. Semakin reaktif sebuah prekursor geopolimer akan menghasilkan geopolimer yang lebih rigid dibanding yang kurang reaktif. Sehingga untuk

merekayasa dayaguna dari geopolimer kita dapat mengatur reaktivitasnya atau dengan kata lain kita mengatur struktur gelas dari prekursor.

Beberapa prekursor aluminosilikat memiliki kandungan silika dan alumina yang berbeda-beda dan juga kandungan pengotor lain yang berbeda beda. Beberapa penelitian menunjukkan kandungan pengotor seperti CaO dan MgO pada prekursor aluminosilikat ini juga akan mempengaruhi reaktivitasnya dalam medium alkali ^[7].

Untuk dapat melihat peranan pengotor tersebut dapat dilakukan karakterisasi dari prekursor tersebut. Prekursor dari aluminosilikat ini dapat direkayasa dengan sintesis dari campuran yang ada dalam prekursor untuk member pendekatan yang relevan. Sintesis prekursor dilakukan dengan *melt-quench* dari hasil lelehan campuran aluminosilikat untuk mendapatkan struktur gelas. karena pada pendinginan biasa akan terbentuk struktur kristalin dari alumina yaitu mullite. Struktur kristalin ini nantinya akan mengurangi kereaktifan dari pasta geopolimer yang dilarutkan dengan alkali aktivator.

1.3 Tujuan Penelitian

- Studi pengaruh pengotor CaO dan MgO masing-masing pada prekursor abu terbang terhadap kristalinitas prekursor aluminosilikat.
- Studi pengaruh kristalinitas terhadap reaktivitas geopolimer dengan medium alkali.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

- a. Sisntesis aluminosilikat berbasis kaolin dan abu terbang

Pada sintesis prekursor aluminosilikat ini digunakan variasi komposisi dengan rasio berat yaitu :

- Abu Terbang $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65 : 35]
- Abu Terbang + $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ [60 : 33 : 7]
- Abu Terbang + $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ [63 : 35 : 2]

- b. Serbuk Alumina yang dipakai adalah jenis *pure analyze*,
- c. Jenis silika yang dipakai adalah jenis *silica flour pure analyze*.
- d. CaO dan MgO yang dipakai adalah jenis *pure analyze*.

- e. Larutan alkali aktivator yang digunakan merupakan sodium silikat/*waterglass* (Na_2SiO_3) jenis PA (*pure analyze*).
- f. Natrium hidroksida (NaOH) yang digunakan jenis PA (*pure analyze*)
- g. Aquadest yang dipakai diperoleh dari Departemen Metalurgi dan Material FTUI
- h. Sintesis aluminosilikat dilakukan dengan metode *Melt-quench*

1.5 Sistematika Penulisan

Penelitian ini dituliskan secara sistematis dengan sistematika penulisan sebagai berikut.

BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang dasar teori mengenai geopolimer, aluminosilikat sebagai prekursor geopolimer dan pengaruh pengotor dalam prekursor.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Memberikan penjelasan mengenai tahapan – tahapan yang dilakukan dalam penelitian yang pembuatan sampel prekursor geopolimer serta pengujian yang dilakukan.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan dan menampilkan data hasil percobaan, proses pengolahan data hasil percobaan, dan analisa hasil percobaan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari hasil kegiatan penelitian dan analisa yang telah dilakukan serta saran yang diberikan sesuai dengan hasil penelitian.

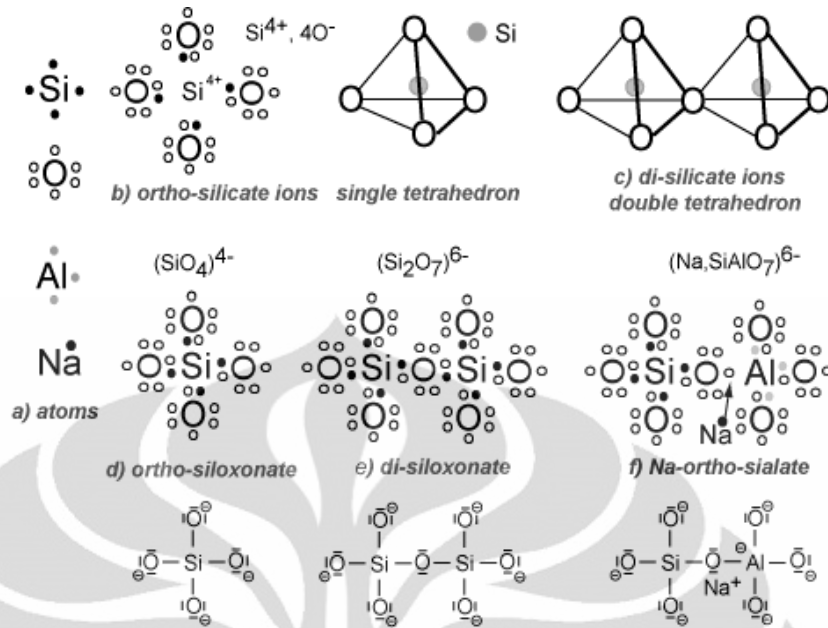
BAB II DASAR TEORI

2.1 Terminologi Geopolimer

Geopolimer sebagai material teknik yang dapat meningkatkan perbendaharaan ilmu material kedepannya. Terminologi geopolimer merujuk pada material unik temuan Prof. Dr. Joseph Davidovits yang disebut *geological glue*. Dimana material ini diperkirakan digunakan pada bangunan pyramid dan juga kuil roma kuno yang dikenal sebagai *ancient cement (carbunculus cement)*.

Geopolimer didefinisikan sebagai polimer anorganik yang memiliki rantai dengan ikatan kovalen secara berulang dengan struktur amorphous. Perbedaan antara geopolimer dengan material polimer anorganik lain terdapat pada prekursornya, dimana polimer organik biasanya menggunakan prekursor dari silikon dan aluminium alkoksit dalam medium alkohol dalam proses *sol-gel* sehingga lebih disebut komponen *organometallic* karena pemakaian medium alkohol (material organic). Sedangkan geopolimer disintesis dari prekursor aluminosilikat yang kemudian direaksikan dalam medium alkali sebagai activator dengan secara keseluruhan geopolimer ini adalah murni material anorganik.

Geopolimer memiliki keunikan dibandingkan dengan polimer anorganik lainnya karena pasta geopolimer memungkinkan terjadinya pengerasan atau *curing* sama halnya dengan polimer termoset. Geopolimer diproses melalui geosintesis atau geopolimerisasi. Gambar 2.1 Menunjukkan geopolimerisasi terjadi pada prekursor aluminosilikat dalam medium alkali dimana Al berbagi satu elektron dengan ion metalloid (ex Na^+ , K^+ atau Ca^+). Kation Na^+ berikatan kuat dengan molekul sialat ($\text{Si} - \text{O} - \text{Al}$) dan menyeimbangkan elektron negatif (*charge balancer*).

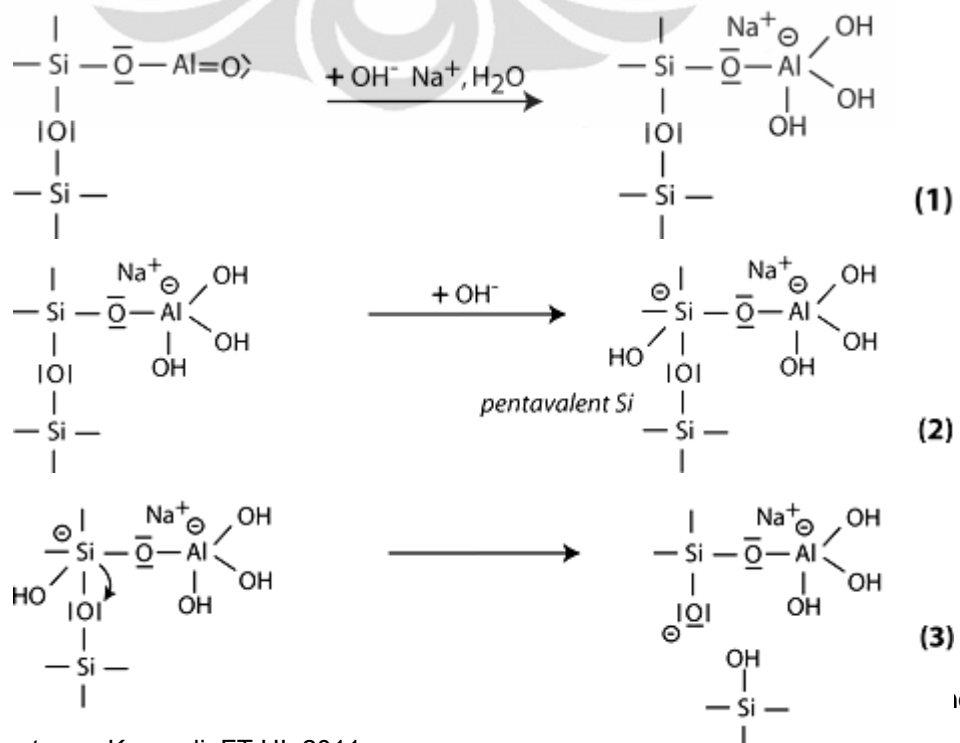


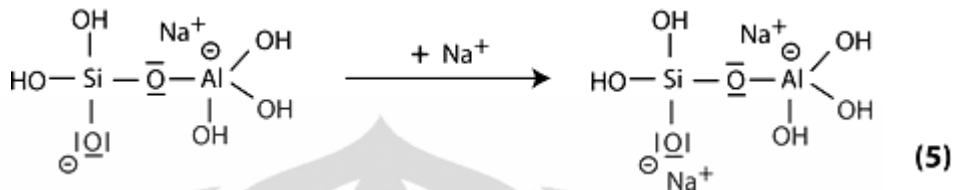
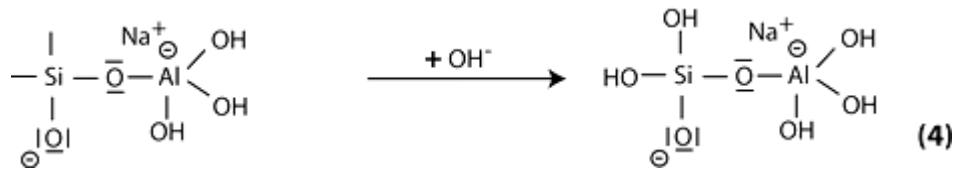
Gambar 2.1 Ikatan kovalen pada geopolimer [1].

Secara sederhana geopolimer terdiri dari tiga tahapan penting yaitu

- Pemutusan ikatan Poly(siloxo) Si – O – Si
- Pembentukan molekul ortho-sialat Si – O – Al
- Polimerisasi (polikondensasi) saat *curing* molekul H₂O akan lepas dan membentuk rantai aluminosilikat secara tiga dimensi.

Gambar 2.2. Menunjukkan secara keseluruhan reaksi aluminosilikat pada medium alkali,

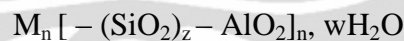




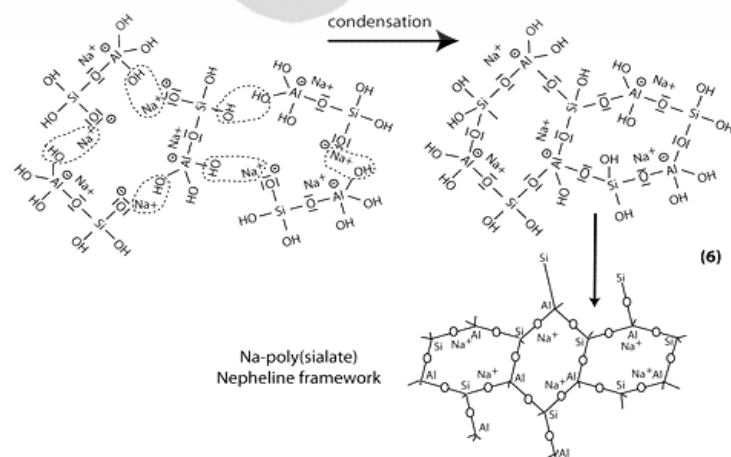
Gambar 2.2 Tahapan reaksi aluminosilikat pada medium alkali [1].

Ion OH^- akan bereaksi dengan ikatan tetrahedral pada Al dan membentuk tangan aluminat ($\text{Al} - \text{OH}$) muatan negatif pada Al^{3+} akan diseimbangkan oleh ion Na^+ (1). Ion OH^- juga akan memutuskan *bridging* oksigen dari Si dan membentuk tangan sialat ($\text{Si} - \text{OH}$) (2) & (3). Dan terbentuklah oligomer dari sialat dan aluminat (4) & (5).

Gambar 2.3 Menunjukkan reaksi polikondensasi pasta geopolimer yang mengalami *curing* dengan melepaskan molekul H_2O sehingga membentuk rantai aluminosilikat secara tiga dimensi. Ikatan rantai tiga dimensi ini akan membentuk struktur geopolimer yang rigid. Pada reaksi polikondensasi ini keseluruhan ikatan dari aluminosilikat adalah ikatan kovalen tidak ada lagi ikatan ionik antar molekul. Derajat polikondensasi dari geopolimer dituliskan dalam persamaan:



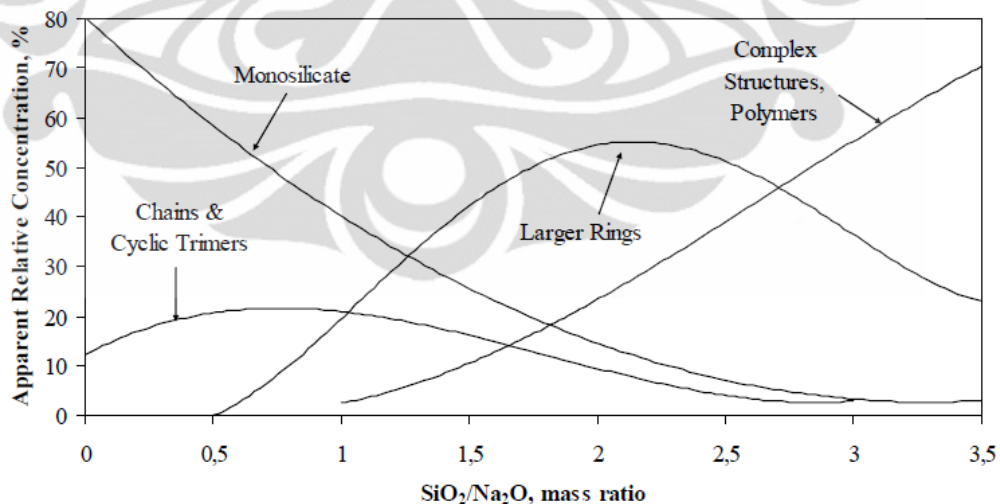
Dimana M adalah kation alkali, z adalah 1,2 atau 3 dan n adalah derajat polikondensasi.



Gambar 2.3 Pelepasan molekul air dan membentuk rantai ikatan kovalen tiga dimensi [1].

Struktur dari geopolimer dapat berbentuk kristalin atau pun non-kristalin (amorf). Struktur kristalin poli(sialat) $(-Si-O-Al-O-)_n$ dan poli(sialat-silokso) $(-Si-O-Al-O-Si-O-)_n$ dihasilkan dengan *curing* dalam kondisi hydrothermal sedangkan *curing* dengan suhu ruang akan menghasilkan struktur geopolimer yang amorf. Tingkat dari ketidakteraturan dari geopolimer amorf dapat dilihat dari karakterisasi XRD. Sebenarnya untuk material amorf tidak dapat memastikan struktur tersebut amorf harus dilakukan juga karakterisasi dengan NMR.

Dalam reaksi geopolimerisasi untuk konsentrasi dari medium alkali seperti sodium silikat harus mencukupi dengan rasio berat $SiO_2 : Na_2O$ lebih besar dari 1 untuk reaksi polikondensasi dan membentuk rantai cincin dan struktur yang lebih kompleks yang digambarkan pada gambar 2.4. Dengan semakin kompleksnya struktur dari maka kekuatan mekanik dari geopolimer juga akan meningkat dibandingkan dengan struktur lembaran ataupun struktur cincin. Struktur yang lebih kompleks didapat dari tingkat reaktivitas prekursor dalam medium alkali. Semakin reaktif prekursor maka akan didapat struktur amorf yang rumit dengan sifat mekanik yang baik.



Gambar 2.4 Diagram perbandingan pembentukan rantai dengan konsentrasi sodium silikat terlarut [9].

Material yang dapat diraksikan dalam medium alkali atau disebut *alkali-activated material* berdasarkan komposisinya sebagian besar dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu (Si+Ca) seperti slag *blast furnace* yang dan (Si+Al) seperti

metakaolin dan abu terbang. Produk dari reaksi dalam medium alkali Si+Al ini menghasilkan produk dengan komposisi kimia menyerupai zeolite dengan struktur seperti polimer sedangkan zeolite sendiri memiliki struktur kristalin, kelompok jenis ini lah yang diberi terminology “Geopolimer” selama memiliki struktur polimerik (Davidovits 1979).

2.2 Prekursor Aluminosilikat

Secara teoritis material utama yang dipakai sebagai prekursor geopolimer yaitu material yang kaya akan silica dan alumina (aluminosilikat), dari beragamnya jenis aluminosilikat yang diperoleh secara alami atau sintetik dibutuhkan pemahaman lebih mendalam terhadap sifat kimia dan juga potensinya dalam reaksi geopolimerisasi.

Pauling (1930-1960) dalam teori ikatan ioniknya menggambarkan kation Si^{4+} dan Al^{3+} yang membentuk struktur koordinasi tetrahedral atau octahedral dengan oksigen. Keberadaan Al^{3+} menyebabkan defisiensi muatan negatif dan dinetralkan dengan kehadiran ion positif dapat seperti kation Na, K, Ca, Mg dan Fe yang membentuk interstisial dari struktur. Peranan dari Al^{3+} ini dapat sebagai *network builder* Al – O Tetrahedral atau *network modifier* Al – O octahedral. Kompleksitas dari struktur aluminosilikat terjadi karena tetrahedral dapat berkoordinasi dengan bentuk 1, 2 dan 3 dimensi serta sambungan tetrahedral (tetrahedral link) Pemahaman terhadap struktur pada aluminosilikat akan memberi pemahaman yang jelas terhadap reaksi yang terjadi pada geopolimer atau geosintesis. Pada umumnya aluminosilikat dapat membentuk beberapa bentuk struktur ikatan yaitu:

- Struktur pulau (nesosilikat) : ortosilikat, di-silikat,
- Struktur grup (sorosilikat dan siklosilikat) : ring silikat, tri-silikat, tetra-silikat, hexa-silikat,
- Struktur rantai (Inosilikat) : linear dan branched, ribbon,
- Struktur lembaran (phyllosilikat) : sheet
- Struktur framework (tektosilikat)

Geopolimer adalah material dengan rantai ikatan kovalen tiga dimensi (framework tektosilikat) dimana susunan rantai molekul ini terdiri dari unit yang berulang.

Dalam geopolimer dikenal beberapa molekul unit penyusun seperti:

- Si-O-Si-O- siloxo, poly(siloxo)
- Si-O-Al-O- sialate, poly(sialate)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly(sialate-siloxo)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly(sialate-disiloxo)
- P-O-P-O- phosphate, poly(phosphate)
- P-O-Si-O-P-O- phospho-siloxo, poly(phospho-siloxo)
- P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly(phospho-sialate)
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone

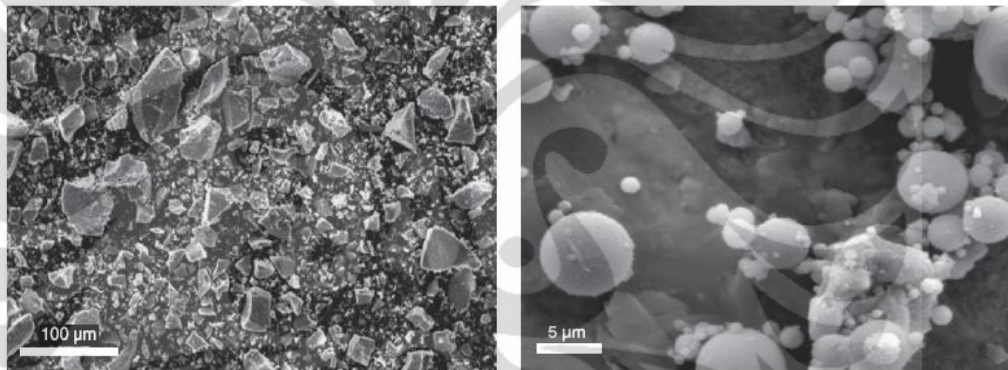
Secara teoritis semua material yang kaya akan silika dan alumina dapat dijadikan geopolimer. Berdasarkan asal prekursor dari geopolimer ini sehingga membagi geopolimer menjadi beberapa kelas:

- Waterglass-based geopolymer, poly(siloxonate), *soluble silicate*, Si:Al=1:0
- Kaolinite / Hydrosodalite-based geopolymer, poly(sialate) Si:Al=1:1
- Metakaolin MK-750-based geopolymer, poly(sialate-siloxo) Si:Al=2:1
- Calcium-based geopolymer, (Ca, K, Na)-sialate, Si:Al=1, 2, 3
- Rock-based geopolymer, poly(sialate-multisiloxo) $1 < \text{Si:Al} < 5$
- Silica-based geopolymer, sialate link and siloxo link in poly(siloxonate) Si:Al>5
- Fly ash-based geopolymer
- Phosphate-based geopolymer
- Organic-mineral geopolymer

Dari beberapa *alkali-activated material* hanya beberapa yang dikembangkan dengan pertimbangan efisiensi energi dan juga pertimbangan lingkungan. Seperti slag dari ekstraksi besi dengan *blast furnace*, prekursor abu terbang yaitu produk sampingan pembakaran batubara dan juga karena pemanfaatan produk sampingan dan prekursor metakaolin hasil kalsinasi dari mineral kaolin.

Berdasarkan komposisinya *alkali-activated material* sebagian besar dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu (Si+Ca) *blast furnace slag* dalam medium alkali dengan tingkat alkalinitas lemah dan (Si+Al) dalam medium alkali dengan tingkat alkalinitas sedang sampai kuat seperti dari kaolin atau dari abu terbang.

Kelebihan dari *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) yaitu memiliki konsistensi dari komposisi kandungan unsur juga sifat mekaniknya serta memiliki partikel yang cukup homogen. Meskipun demikian komposisi kimia dari GGBFS tergantung spesifik pada furnace dan juga bijih yang digunakan. Sedangkan prekursor dari material abu terbang memiliki bentuk partikel yang bulat dibandingkan GGBFS. Pada gambar 2.5 memperlihatkan gambar SEM perbandingan bentuk partikel pada abu terbang dan GGBFS.

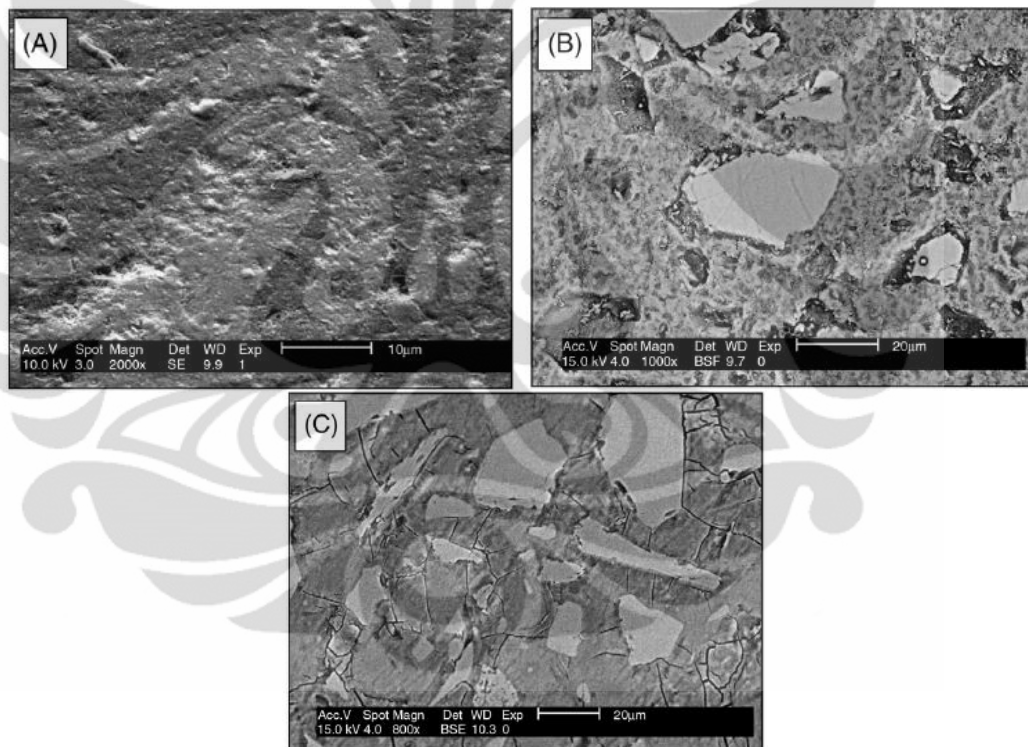


Gambar 2.5 a. Gambar SEM dari GGBFS dengan bentuk yang tidak beraturan [10], b. Gambar SEM dari abu terbang kelas F yang berbentuk bulat dari Gladstone power station, Australia [11].

Bentuk partikel abu terbang yang bulat dan homogen dapat mengurangi kebutuhan air (meningkatkan reaktivitas) dan dapat meningkatkan padatan partikel serta mengurangi porositas. Material ini diproses dengan meleleh dalam furnace dan kemudian terjadi pendinginan cepat dengan udara dan membentuk partikel gelas yang bulat. Abu terbang ini memiliki variabel yang luas dibandingkan GGBFS, tidak hanya karena adanya pengotor juga dari proses pembakaran dan proses pendinginan cepat. Gelas GGBFS secara umum memiliki derajat depolimerisasi lebih rendah dari abu terbang.

Prekursor dari metakaolin (MK) diperoleh dari kalsinasi dari mineral kaolin pada temperatur antara 650⁰C sampai 800⁰C tergantung pada kemurnian (SiO₂ dan Al₂O₃) dan juga kristalinitasnya [12]. Metakaolin memiliki struktur

amorf yang digunakan untuk geopolimer dan sangat bervariasi pada ukuran partikel, kemurnian dan juga kristalinitas dari sumber metakolin. Berbeda untuk prekursor GGBFS dan abu terbang yang dapat dikontrol dari proses produksi. Perbedaan dari metakaolin dengan GGBFS yaitu pada konsep fasa “gelas” pada GGBFS sedangkan metakolin fasa “amorf”. Dimana GGBFS dan juga abu terbang melalui fasa cair kemudian mengalami pendinginan cepat sedangkan metakaolin hanya mengalami peningkatan temperatur dibawah suhu leleh untuk memecahkan struktur kristalnya. Gambar 2.6 memperlihatkan hasil permukaan SEM dari *alkali-activated* metakaolin *alkali-activated* GGBFS dan campurannya. Pada *alkali-activated* metakaolin terlihat permukaan yang lebih homogen sedangkan *alkali-activated* GGBFS partikel yang dikelilingi matrix.



Gambar 2.6 Perbandingan permukaan SEM dari (a)*alkali-activated* metakaolin (b)campuran metakaolin dan GGBFS dan (c) *alkali-activated* GGBFS [13].

2.3 Material Alkali-Activated

Untuk mensintesis prekursor aluminosilikat membutuhkan kondisi pH yang tinggi, konsentrasi kation alkali, tekanan atmosfer dan juga suhu *curing* dibawah 100°C. Sehingga disebutkan sebagai *alkali-activation aluminosilicate*. Geopolimer adalah material dengan dasar aluminosilikat yang terdiri dari SiO₄ dan

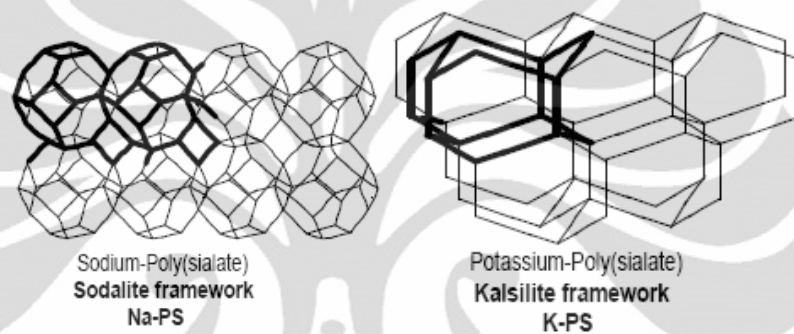
Tabel 2.1 Sejarah penggunaan material alkali activator yang penting [14].

Author	Year	Significance
Feret	1939	Slags used for cement.
Purdon	1940	Alkali-slag combinations.
Glukhovsky	1959	Theoretical basis and development of alkaline cements.
Glukhovsky	1965	First called "alkaline cements".
Davidovits	1979	"Geopolymer" term.
Malinowski	1979	Ancient aqueducts characterized.
Forss	1983	F-cement (slag-alkali-superplasticizer).
Langton and Roy	1984	Ancient building materials characterized.
Davidovits and Sawyer	1985	Patent of "Pyrament" cement.
Krivenko	1986	DSc thesis, $R_2O-RO-SiO_2-H_2O$.
Malolepsy and Petri	1986	Activation of synthetic melilite slags.
Malek et al.	1986	Slag cement-low level radioactive wastes forms.
Davidovits	1987	Ancient and modern concretes compared.
Deja and Malolepsy	1989	Resistance to chlorides shown.
Kaushal et al.	1989	Adiabatic cured nuclear wastes forms from alkaline mixtures.
Roy and Langton	1989	Ancient concretes analogs.
Majundar et al.	1989	$C_{12}A_7$ -slag activation.
Talling and Brandstetr	1989	Alkali-activated slag.
Wu et al.	1990	Activation of slag cement.
Roy et al.	1991	Rapid setting alkali-activated cements.
Roy and Silsbee	1992	Alkali-activated cements: an overview.
Palomo and Glasser	1992	CBC with metakaolin.
Roy and Malek	1993	Slag cement.
Glukhovsky	1994	Ancient, modern and future concretes.
Krivenko	1994	Alkaline cements.
Wang and Scivener	1995	Slag and alkali-activated microstructure.
Shi	1996	Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag.
Fernández-Jiménez and Puertas	1997	Kinetic studies of alkali-activated slag cements.
Katz	1998	Microstructure of alkali-activated fly ash.
Davidovits	1999	Chemistry of geopolymeric systems, technology.
Roy	1999	Opportunities and challenges of alkali-activated cements.
Palomo	1999	Alkali-activated fly ash – a cement for the future.
Gong and Yang	2000	Alkali-activated red mud-slag cement.
Puertas	2000	Alkali-activated fly ash/slag cement.
Bakharev	2001–2002	Alkali-activated slag concrete.
Palomo and Palacios	2003	Immobilization of hazardous wastes.
Grutzeck	2004	Zeolite formation.
Sun	2006	Sialite technology.
Duxson	2007	Geopolymer technology: the current state of the art.
Hajimohammadi, Provis and Deventer	2008	One-part geopolymer.
Provis and Deventer	2009	Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications.

AlO_4 tetrahedral yang dihubungkan dengan penggunaan oksigen secara bersama. Untuk menyeimbangkan *charge balance* dari Al^{3+} sehingga membutuhkan ion

positif seperti Na^+ , K^+ , L^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+ dll. Sedangkan medium basa diperlukan untuk memutuskan *bridging oxygen* dari Si untuk membentuk siliksol (Si-OH). Penelitian mengenai medium alkali sebagai activator atau alkali activator ini sebenarnya sudah ditemukan pada tahun 1940 yang kemudian terus dikembangkan, pada tabel 2.1 menggambarkan sejarah perkembangan *material alkali activator* yang paling berpengaruh.

Dalam mereaksikan geopolimer dalam medium alkali biasanya dipakai NaOH atau KOH. Pada gambar 2.7 struktur molekul polisialat berbasis sodium dan potasium dalam kondisi hydrothermal.



Gambar 2.7 Struktur dari geopolimer berbasis sodium-polisialat (Na-PS) dan berbasis potasium-polisialat (K-PS) [1].

Untuk mendapat struktur molekul kristalin proses *curing* harus dalam kondisi hidrotermal sedangkan geopolimer yang dipakai dalam aplikasi sebagai binder atau yang lainnya adalah dengan stuktur amorf (non-kristalin) sehingga *curing* hanya dilakukan pada suhu dibawah 100°C . Bentuk strukturnya yang amorf ini sebanding dengan tekto-aluminosilikat seperti zeolite dengan sifat menyerupai zeolite seperti ketahanan kimia yang sangat tinggi.

2.4 Pengaruh Ca dan Mg

Bedasarkan beberapa jenis material *alkali-activated aluminosilikat* yang dapat digunakan sebagai prekursor geopolimer, masing-masing memiliki tingkat reaktivitas yang berbeda dalam medium alkali. Yang masing-masing dipengaruhi oleh komposisi kimia, struktur gelas, asal/sumber prekursor, *workability*, ukuran partikel dll^[12]. Terdapat beberapa formulasi atau perhitungan yang digunakan untuk menghitung reaktivitas dari prekursor yang menyangkut peningkatan sifat

dari geopolimer itu sendiri. Komposisi dari prekursor aluminosilikat dapat digunakan untuk melihat tingkat reaktivitas dari reaksi geopolimerisasi.

Dalam material aluminosilikat biasanya mempunyai kandungan lain selain Si dan Al yaitu Ca dan juga Mg seperti abu terbang yang membentuk komposisi gehlenit ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) dan arkermanite ($2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$). Dalam medium alkali akan terjadi reaksi depolimerisasi yang sebanding dengan tingkat reaktivitas. Meskipun prekursor dengan struktur gelas yang memiliki reaktivitas lebih tinggi dibanding dengan prekursor dengan struktur kristalin. Atau dengan kata lain dapat dilihat dari kecepatan pendinginannya sehingga dapat membentuk struktur gelas aluminosilikat. Derajat depolimerisasi (DP) dari gelas aluminosilikat dapat diformulasikan sebagai

$$\frac{\text{Free Ca}}{\text{Free Si}} = \frac{\text{Total Ca} - \text{Ca in gehlenite} - \text{Ca in arkermanite}}{\text{Total Si} - \text{Si in gehlenite} - \text{Si in arkermanite}}$$

Dan jika terdapat kandungan Mg dalam arkermanite dan kandungan semua kandungan Al hanya ada dalam gehlenite menjadi.

$$DP = \frac{n(\text{CaO}) - 2n(\text{MgO}) - n(\text{Al}_2\text{O}_3) - n(\text{SO}_3)}{n(\text{SiO}_2) - 2n(\text{MgO}) - 0.5n(\text{Al}_2\text{O}_3)}$$

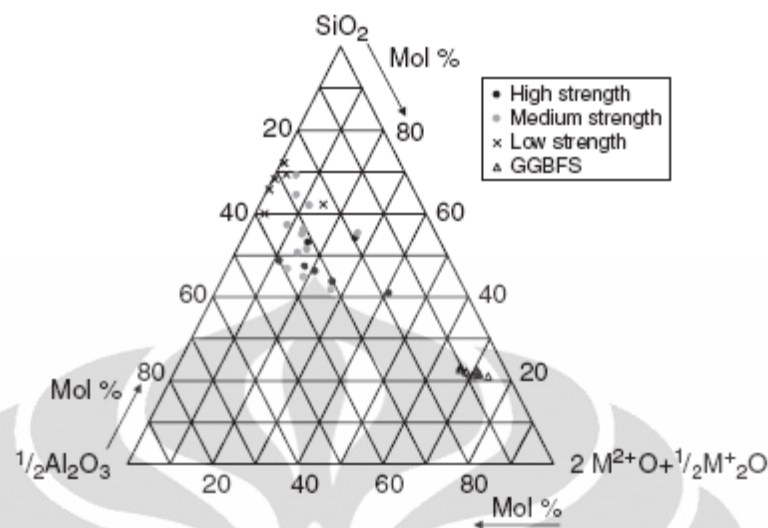
Nilai DP ini merepresentasikan reaktivitas dari silika network dalam medium alkali. Beberapa penelitian juga telah memperlihatkan bahwa reaksi dalam medium alkali ini juga ditentukan dari ukuran partikel. Jenis prekursor dari slag *blast furnace* dengan ukuran partikel $>20\mu\text{m}$ bereaksi lambat. Sedangkan partikel dengan ukuran $2\mu\text{m}$ bereaksi sempurna dan dalam waktu 24 jam^[15].

Selain mempengaruhi reaktivitas dari geopolimerisasi komposisi kimia juga memperlihatkan pengaruh terhadap nilai karakteristik dari sifat mekanik geopolimer. Pada gambar 2.7 memperlihatkan plot komposisi kimia pada jenis geopolimer abu terbang yang juga mengindikasikan kekuatan material yang didapat dari reaksi geopolimerisasi. Plot komposisi memperlihatkan pseudo-ternary data pada kandungan alkali tanah (M^{2+}O) dan logam alkali (M_2^+O).

Dalam material gelas oksida terdapat tiga jenis ikatan menurut fungsinya yaitu *network former* (Silikon, boron dan germanium), *intermediate* (titanium, aluminium, zirconium, magnesium dll) dan *network modifier* (kalsium, litium,

potassium dll). *Network former* adalah unsur pembentuk struktur gelas atau *glass former* yang memiliki temperature transisi gelas (T_g). Sedangkan unsure *intermediate* dapat berfungsi sebagai *network former* ataupun *network modifier* tergantung komposisinya.

Kation-kation tersebut berperan sebagai *network modifier*. Pada Gambar 2.8 terlihat abu terbang dengan sedikit *network modifier* menghasilkan produk dengan sifat mekanik yang rendah sehingga terlihat jelas fungsi *network modifier* juga meningkatkan kekuatan material. Sebuah penelitian mengenai pengaruh Ca dalam geopolimerisasi dilakukan dengan membandingkan 7 prekursor kalsium silikat yang menunjukkan bahwa reaksi geopolimerisasi sangat tergantung pada kristalinitas prekursor dan *thermal history* dari prekursor dan juga alkalinitas dari medium alkali^[16]. Ca yang terlarut dalam kalsium silikat pada *slag blast furnace* dalam alkalinitas rendah akan membentuk hidrat kalsium silikat dengan struktur gelas yang berkonjungsi dengan ikatan geopolimer. Sedangkan kalsium silikat yang dari sumber mineral alami memiliki Ca terlarut yang lebih rendah sehingga hanya sedikit hidrat kalsium silikat yang terbentuk dan menghasilkan geopolimer dengan kekuatan yang lebih rendah. Hal ini juga memperlihatkan adanya gelas hidrat kalsium silikat dapat berikatan dengan ikatan gelas geopolimer yang dapat meningkatkan kekuatan dari geopolimer dalam alkalinitas rendah^[16]. Tetapi hidrat kalsium silikat ini hanya sedikit terbentuk pada alkalinitas tinggi dan justru menunjukkan penurunan kekuatan mekanis dari polimer.^[16] Hal ini dijelaskan karena kelarutan dari Si akan naik dengan meningkatnya pH sedangkan kelarutan Ca menurun dalam meningkatnya pH^[17].

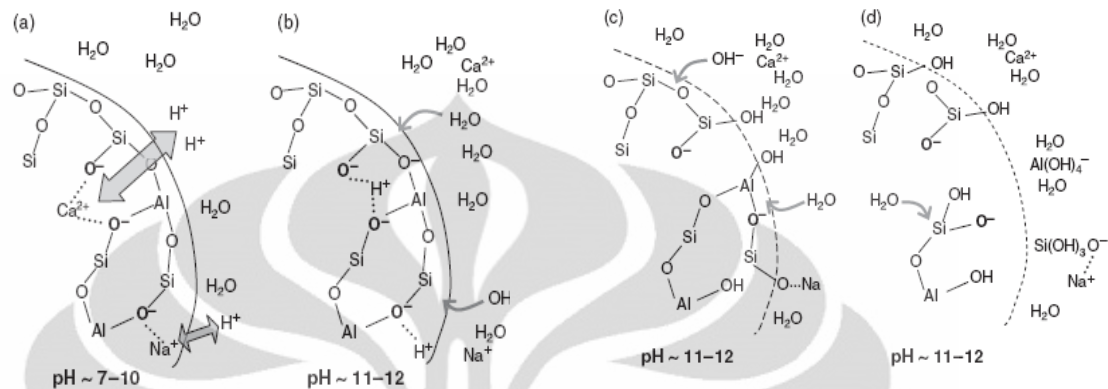


Gambar 2.8 Diagram pseudo-ternary dari komposisi abu terbang juga GGBFS yang memperlihatkan kekuatan dari geopolymer [7].

Mekanisme terlarutnya gelas aluminosilikat yang mengandung monovalent dan divalent kation *network modifier*. Secara termodinamika ikatan Al – O – Si akan lebih dulu putus dibanding Si – O – Si kemudian ikatan dari *network builder* dan *network modifier* yang lebih lemah. Tetapi kation dari *network modifier* ini akan memberi *charge balance* untuk membentuk non-bridging oxygen (NBO) atau memutus ikatannya Si– O – Si^[18&19]. Pada gambar 2.9 memperlihatkan mekanisme terlarutnya gelas dimana proses pemutusan ikatan sebagian besar dipengaruhi oleh *surface charging behavior*.

Keberadaan dari kation alkali tanah tersebut memberi kecenderungan membentuk *disorder framework* atau struktur gelas amorf. Termasuk membentuk sedikit ikatan yang lemah dan reaktif, ikatan Al – O – Al dan juga NBO. Sehingga dapat dijelaskan mengapa kandungan Ca⁺ dan Mg²⁺ sebagai modifier menjadikan prekursor yang baik untuk reaksi geopolimerisasi. Peranan kandungan Ca terlarut akan menjadikan reaksi lebih kompleks, Ca dapat membentuk endapan Ca(OH)₂ yang akan menurunkan alkalinitas dari medium alkali dan memberikan *driving force* untuk terlarutnya unsur Si dan Al, ataupun dapat ikut membentuk ikatan geopolimer yang bereaksi dalam larutan silikat atau aluminat^[20].

Kandungan Ca dan Mg ini juga diteliti dapat meningkatkan *setting time* dari pasta geopolimer dikarenakan adanya endapan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ atau hidrat kalsium sialat yang terbentuk yang membentuk titik nukleasi heterogeneous yang memicu pembentukan geopolimer secara cepat^[20].



Gambar 2.9 Kation Ca^{2+} dan Na^+ sebagai network modifier putus dan keluar dari permukaan kemudian mendorong silikon untuk membentuk NBO dengan OH^- membentuk siloxol [7].

2.5 Kestabilan Fasa dan Transisi Gelas

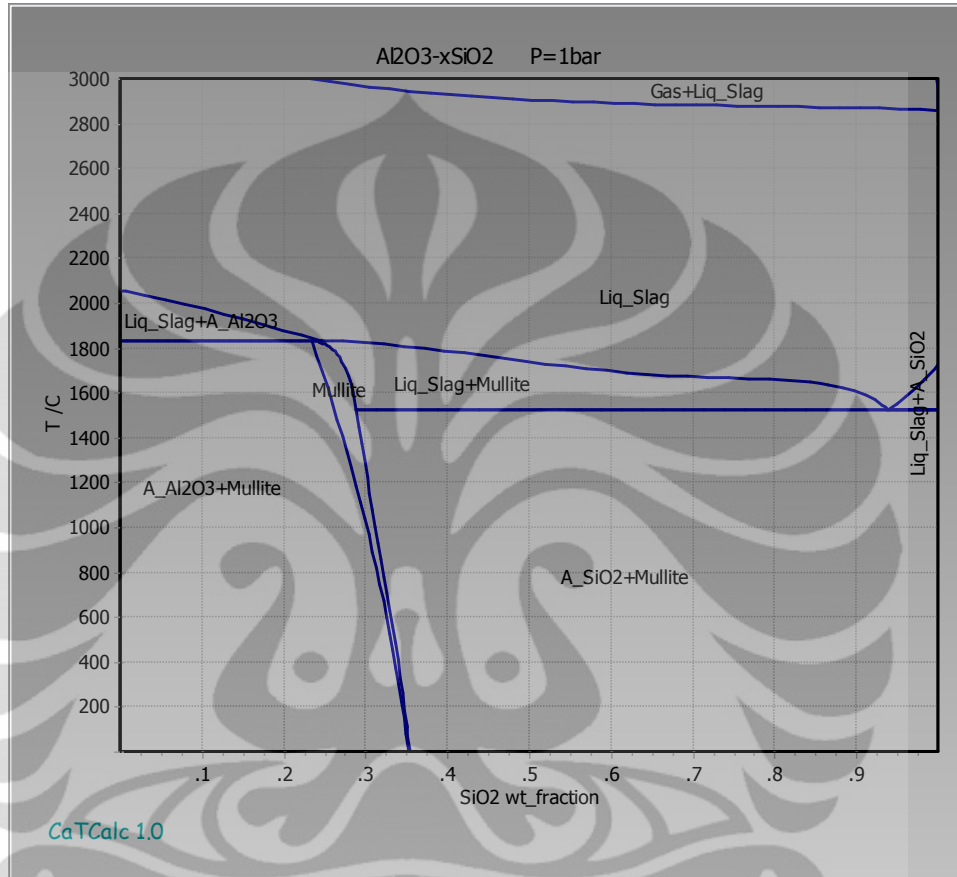
Pada material keramik kestabilan fasa dipengaruhi oleh tekanan, temperatur dan juga komposisi. Sehingga dibutuhkan model diagram 3 dimensi p-T-x dalam sebuah kesetimbangan fasa. Sedangkan jika dilakukan pada tekanan yang konstan ($p=\text{konstan}$). Sistem dua komponen diklasifikasikan menjadi:

1. Sempel eutektik
2. Intermediate compounds
 - a. *Congruent melting*
 - b. *Incongruent melting*
 - c. *dissociation*
3. Solid Solution
 - a. *Complate*
 - b. *Partial*

Tamabahan pertimbangan dalam kesetimbangan fasa yaitu

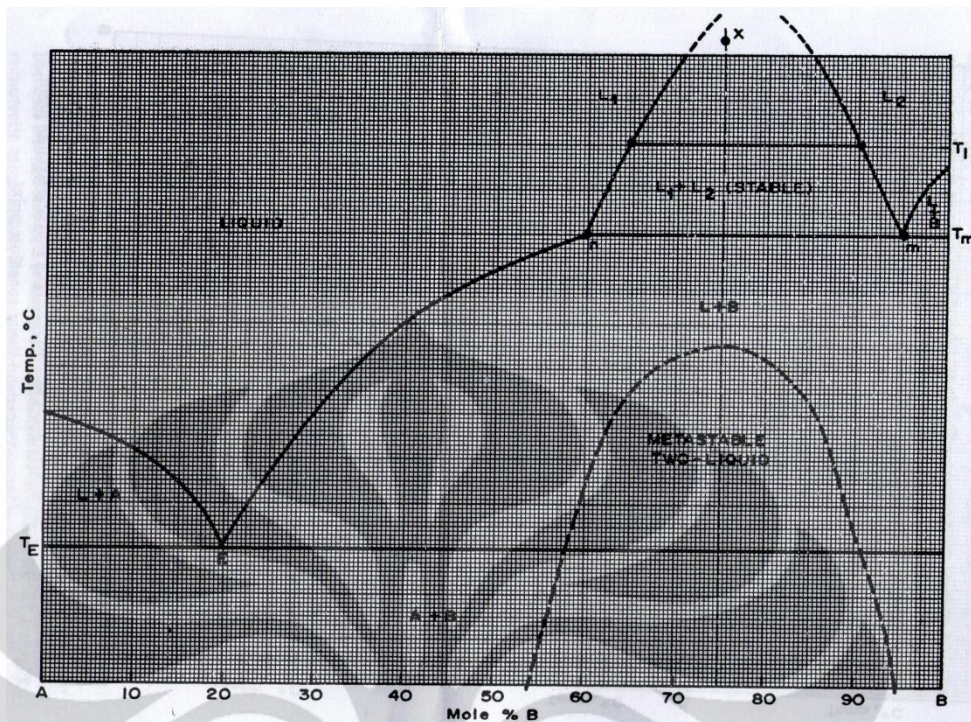
1. *Immiscibility* dalam daerah liquid
2. *Unmixing* dari *solid solution* atau “*exsolution*”
3. *Solid polymorph*

Tranformasi fasa ideal pada sistem $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ditunjukkan pada Gambar 2.10 dimana terdapat *solid solution* yaitu fasa Mullite. Diagram fasa kesetimbangan ideal sistem $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ diperoleh dengan menggunakan permodelan dari software CaTCalc Ver 1.0 (*demo version*).



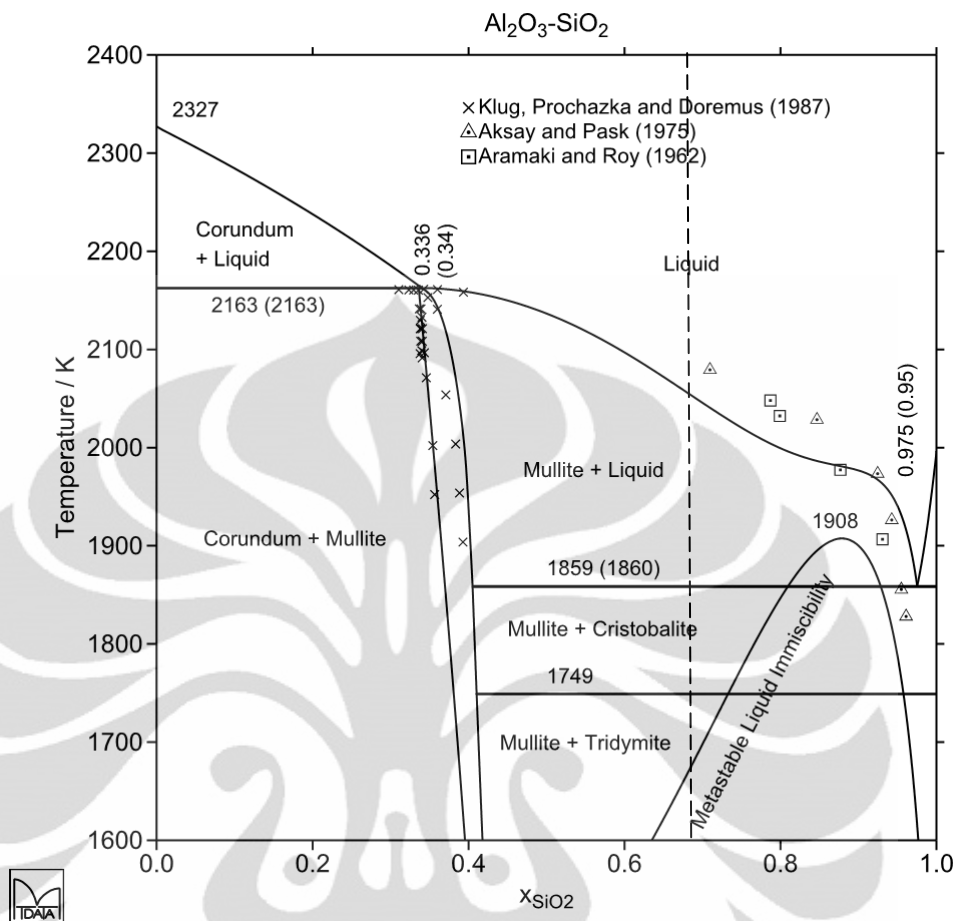
Gambar 2.10 Digram fasa ideal sistem $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ [21].

Daerah *liquid immiscibility* adalah daerah dimana dua fasa *liquid* tidak saling larut atau memiliki dua fasa terpisah, yaitu $L_1 + L_2$. Pada gambar 2.11 memperlihatkan sebenarnya fasa metastabil pada material silikat berasal dari daerah $L_1 + L_2$ yang setabil pada fasa *liquid* dan suhu tinggi dimana kedua fasa yang saling tidak larut dipaksa turun pada suhu rendah yang seharusnya terjadi *solid solution* terjadi dekomposisi menjadi dua fasa terpisah dalam dalam struktur *liquid solid* (gelas).



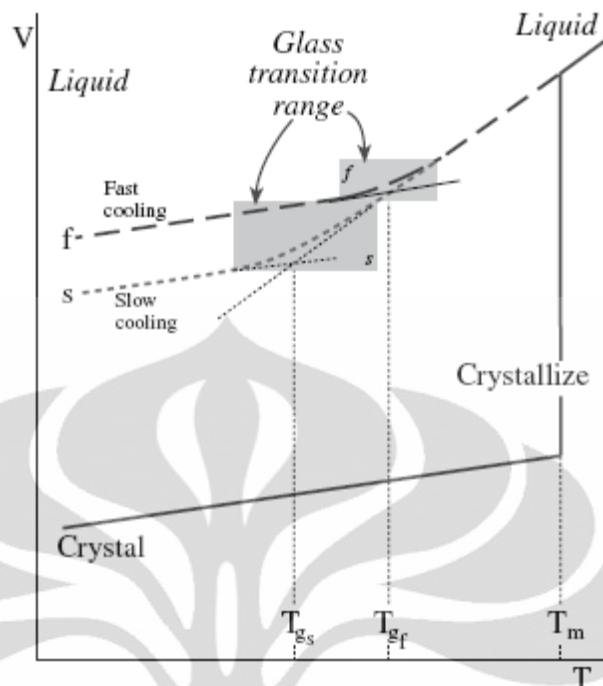
Gambar 2.11 Diagram daerah *immiscibility* material silikat [22].

Aktivitas, koefisien aktivitas dan energi bebas dalam perhitungan campuran larutan $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ dalam diagram fasa diperlihatkan pada gambar 2.12. Pada daerah *metastable liquid immiscibility* terjadi *glass-in-glass immiscibility* pada komposisi Al_2O_3 karena Al_2O_3 berlebih dapat menyebabkan pembentukan kristal dengan cepat dari Al_2O_3 . Daerah ini merupakan penyimpangan dari pencampuran ideal dari $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ pada transformasi fasa ideal pada gambar 2.10 karena terjadi dekomposisi dari fasa *solid solution* yaitu Mullite yang terdekomposisi menjadi SiO_2 -rich dan Al_2O_3 -rich. Daerah metastabil ini diperoleh dengan pendinginan cepat dari fasa liquid SiO_2 dan Al_2O_3 pada suhu rendah sehingga akan membentuk struktur gelas dalam reaksi subsolidus dari *crystalite-Corundum* [23]. Pada gambar 2.12 menunjukkan Plot komposisi dari rasio $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ dan dengan daerah metastabil yang lebih rendah.



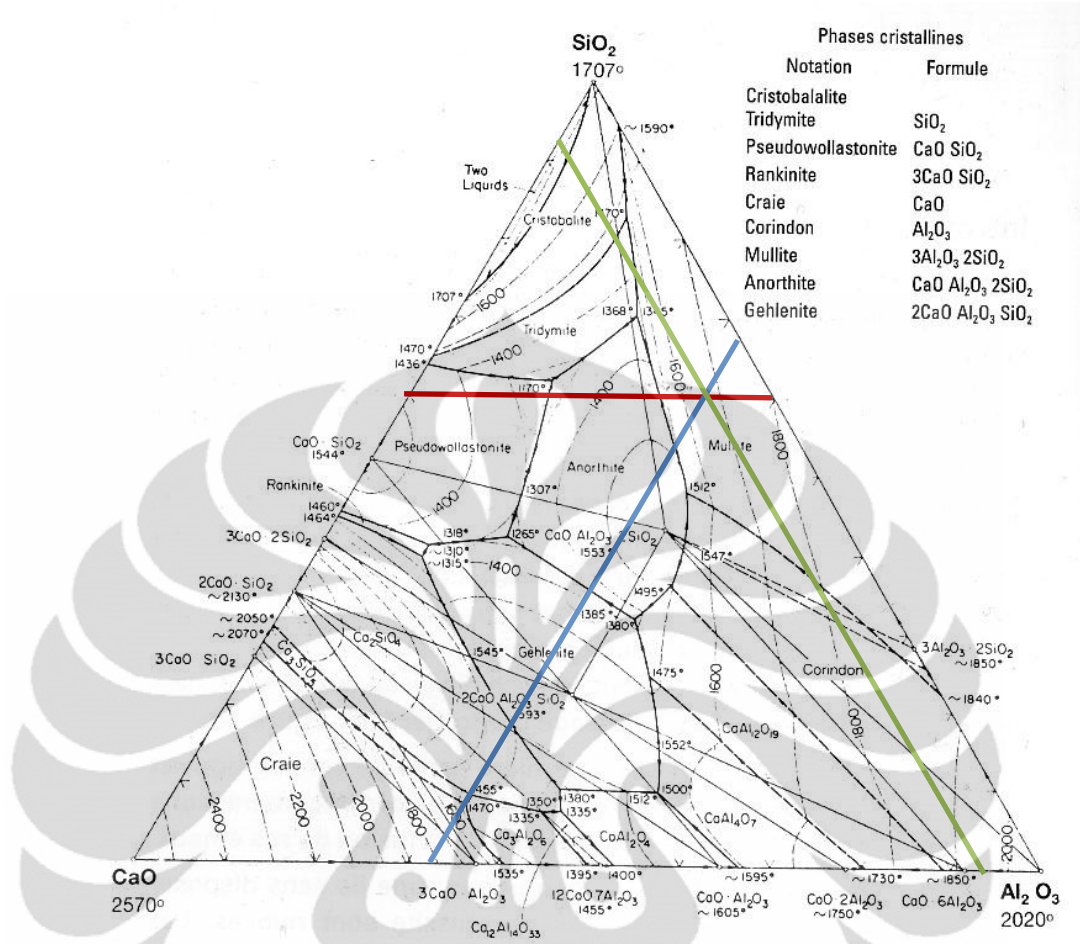
Gambar 2.12 Daerah liquid metastable immiscibility sistem $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ [24].

Material silika mempunyai temperatur transisi gelas (*glass former*) yaitu sebesar energi yang dibutuhkan untuk memutuskan dan menyambung kembali ikatan kovalen dan membentuk struktur amorf (rantai acak). Temperatur gelas (T_g) dipengaruhi oleh komposisi kimia dari material silikat penambahan unsur dengan valensi dibawah empat akan membantu pemutusan ikatan atau menurunkan T_g [25]. Sedangkan material kriatalin hanya memiliki titik leleh (T_m). gmabar 2.13 menunjukkan diagram *Time-Temperature-Transition* (TTT) dari material gelas dengan dengan plot spesifik volume dengan temperature.

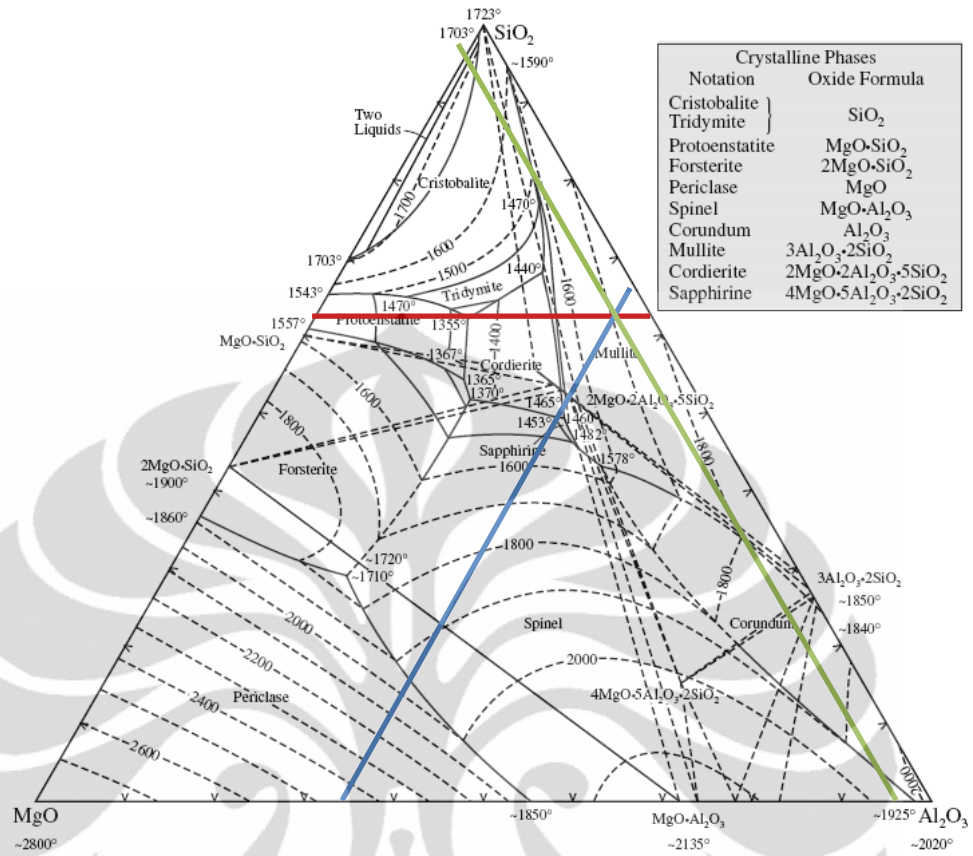


Gambar 2.13 Diagram TTT Volume Vs Temperatur dari *liquid* yang membentuk struktur gelas dan kristalin temperature transisi gelas T_g tergantung pada laju pendinginannya[26].

Sedangkan pengaruh kesetimbangan fasa dengan pengaruh pengotor CaO dan MgO akan menurunkan titik leleh dari aluminosilikat. Diperlihatkan pada gambar 2.14 memperlihatkan *ternary* diagram dari sistem CaO-SiO₂-Al₂O₃ pada komposisi berat 7:33:60 yang membentuk fasa *solid solution* yaitu mullit dengan titik leleh sekitar 1680⁰C sedangkan tanpa kandungan CaO titik lelehnya berkisar pada temperature 1800⁰C. Dan gambar 2.15 maing-masing diagram ternary dari sistem MgO-SiO₂-Al₂O₃ pada komposisi berat 2:35:63 yang membentuk fasa *solid solution* yaitu mullit dengan titik leleh sekitar 1720⁰C sedangkan tanpa kandungan MgO titik lelehnya sekitar 1800⁰C.



Gambar 2.14 Diagram ternary pada sistem $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ [26].



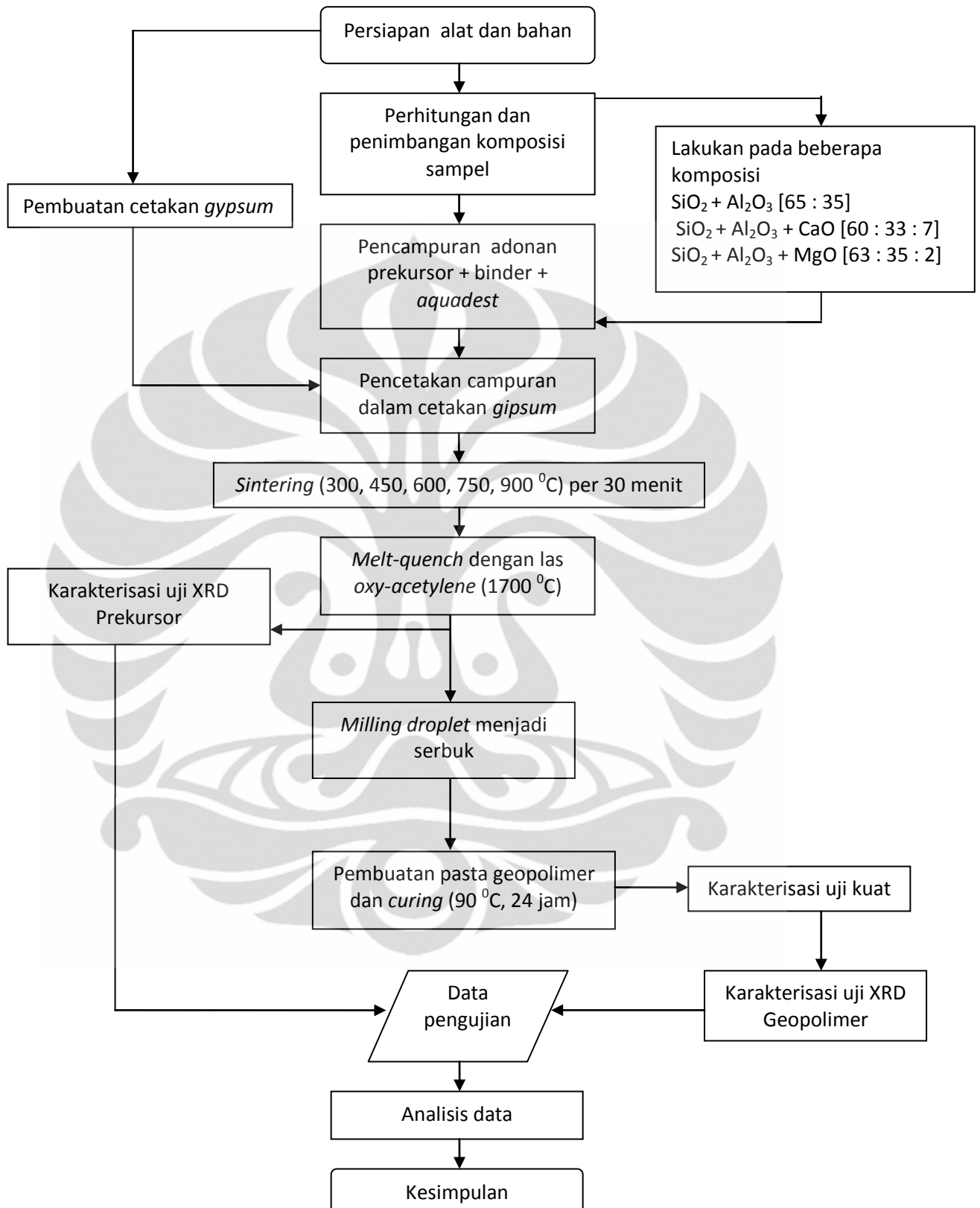
Gambar 2.15 Diagram ternary pada sistem SiO₂ – Al₂O₃ – MgO [26].

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode penelitian secara sistematis meliputi beberapa tahapan yang meliputi persiapan sampel, pembuatan sampel, karakterisasi sampel dan analisa data. Persiapan sampel meliputi perhitungan komposisi SiO_2 , Al_2O_3 , CaO dan MgO . Pencampuran dilakukan sesuai dengan komposisi berat dari prekursor abu terbang. Kemudian dilakukan pencetakan dengan metode *slip-casting*. Sampel kemudian dilakukan sintering. Sampel kemudian dilakukan pendinginan cepat dengan pelelehan menggunakan metode *melt-quench* dan dilakukan pendinginan cepat dalam *aquadest*. Sampel kemudian dilakukan karakterisasi.

3.1 Diagram Alir

Berikut ini Gambar 3.1, digambarkan pada diagram alir yang menggambarkan secara umum kegiatan penelitian yang dilakukan dalam pembuatan abu terbang sintetik dan pengaruh kandungan pengotor pada abu terbang. Dan mempelajari karakteristik dari prekursor sintetik dari abu terbang.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

Bahan :

- Gypsum
- Alumina powder (ALCOA) 99.7%
- Silika Flour 97 %
- CaO 99,5%
- MgO 99,5%
- *Talc*
- Dispex (binder & dispersan)
- *Aquadest*
- Natrium silika
- NaOH (pelet) 99%

Peralatan :

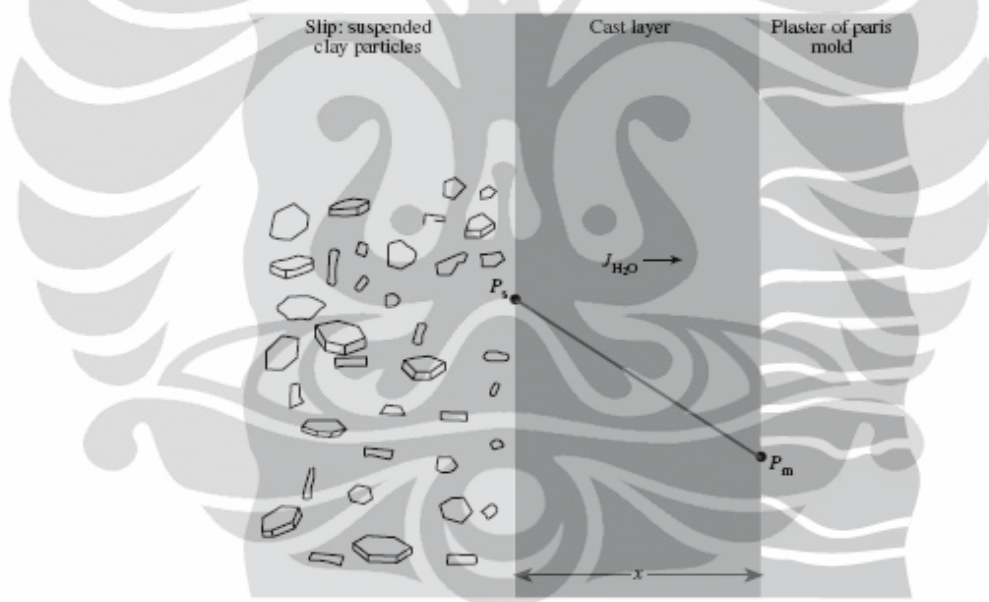
- Cetakan gipsum
- Timbangan digital
- Oven
- Mixer (blender)
- Las oxy-acetylene
- Wadah (*stainless steel*)
- Hair dryer
- *Ball mill*
- Cetakan geopolimer (1,2x2,4 cm)
- Alu (pengiling)
- Instrument uji kuat tekan
- XRD instrument

3.3 Sintesis Prekursor

a. Pembuatan cetakan gipsum dan pencetakan *slip-casting*

Slip-casting adalah teknik pembentukan material seperti clay. *Slip-casting* dilakukan dengan menggunakan cetakan gipsum. Dalam *slip casting*, air dipisahkan dan dikeluarkan dari suspensi campuran sampel dari penyerapan air dengan adanya pori-pori kapiler cetakan gipsum pada dinding gipsum (plaster). Dan terjadi pengerasan dari partikel-partikel yang mengikuti bentuk cetakan.

Pada gambar 3.2 memperlihatkan skema penyerapan air pada dinding kapiler cetakan gipsum. Agar sampel tidak menempel pada dinding cetakan saat mengering, sebelumnya permukaan dinding cetakan dilapisi terlebih dahulu dengan *talc* (bedak) sehingga akan memudahkan pelepasan sampel dari cetakan saat sudah mengering.



Gambar 3.2 skema penyerapan air pada dinding kapiler dari cetakan gipsum[26].

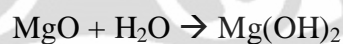
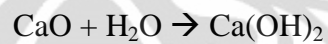
b. Pencampuran SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO

Prosedur pembuatan meliputi pencampuran serbuk silika dan alumina bersamaan dengan binder dan dispersan dalam *aquadest* untuk memungkinkan pencampuran yang homogen. Campuran silika dan alumina kemudian diaduk dalam mixer dan dicetak. Pada sintesis prekursor alumino silikat ini digunakan variasi komposisi dengan rasio berat yaitu :

1. Fly ash $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65 : 35]
2. Fly ash $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ [60 : 33 : 7]
3. Fly ash $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ [63 : 35 : 2]

Pencampuran dilakukan dengan mixer (blender) yang masing masing dicampur dengan 60gr *aquadest*, dan 1gr DISPEX yang berfungsi sebagai binder dan juga dispersan agar pencampuran yang dilakukan homogen. Suspensi dibuat %60 berat karena menghasilkan agar didapatkan densitas dan porositas yang baik serta penyusutan yang tidak terlalu besar. Semakin banyak kontak antar partikel akan mengefektikan proses sintering^[27]. Mixing dengan blender dilakukan pada selam 15-20 menit. Setelah suspense campuran selesai dibuat kemudian dituangkan dalam cetakan gipsum plester. Agar suspensi sampel yang dituangkan tidak menempel pada dinding gipsum, dinding gipsum dilapisi dengan bedak (talc) sehingga suspense yang sudah mengeras dapat dibuka dengan mudah dan tidak pecah. Suspense sampel mengeras dalam waktu 2 jam, tetapi dalam penelitian ini pengerasan dilakukan selama sehari untuk memastikan penyerapan air secara sempurna.

Tetapi pertimbangan reaksi eksotermis dari CaO dan MgO dengan *aquadest*. Dan menghasilkan pada saat bereaksi dengan air.

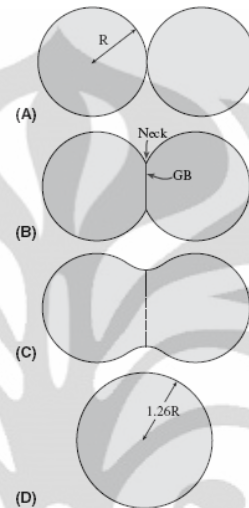


Karena *aquadest* bereaksi dengan CaO dan membentuk Ca(OH)_2 sehingga akan menyulitkan proses *slip-casting* karena kandungan air akan habis bereaksi dengan CaO dan partikel suspensinya tidak mengeras secara sempurna dan sangat rapuh. Ini juga menjadi salah satu kendala dalam penelitian.

c. Sintering

Sintering adalah perubahan bentuk dari material dari bentuk serbuk menjadi bentuk padat dengan pemanasan. Prinsip pemadatan material yaitu dengan mengurangi porositas sehingga terjadi peningkatan kekuatan. Proses sintering ini dilakukan agar sampel dapat dengan mudah dilakukan untuk proses selanjutnya yaitu pelelehan dengan *melt-queench*. Hal yang paling utama dalam proses sintering ini adalah temperature sintering itu sendiri. Dalam proses

sintering akan terbentuk batas-batas butir yang merupakan tahapan permulaan dari rekristalisasi. Pada gambar 3.3 dalam penyatuan penyatuan juga dipengaruhi oleh tegangan permukaan dari masing-masing partikel. Juga ada pengaruh transport massa dan juga proses difusi yang memungkinkan dalam sintering karena adanya *driving force* dari panas.



Gambar 3.3 Mekanisme sintering [26].

Sintering dilakukan dengan bertahap untuk menghindari *thermal shock* pada temperatur 300 °C, 450 °C, 600 °C, 750 °C, dan 900 °C dengan masing-masing temperatur selama 30 menit dengan bentuk hasil akhir sempel berupa batangan *rod*.

d. *Melt-quench*

Untuk membuat prekursor aluminosilikat ini dilakukan pencampuran silika dan alumina untuk membentuk aluminasilikat dengan metode *melt-quench*. Setelah disinter akan terbentuk batangan $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ yang akan dilakukan *melt-quench* pada suhu 1600-1800°C sesuai diagram fasa $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ pada titik lelehnya. Untuk mencapai suhu tersebut dipakai api dari las oxy-acetylene. Batang $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ yang akan dilelehkan dipegang dengan penjepit baja perkakas agar dapat tahan pada temperatur tinggi. Proses pelelehan ini harus berlangsung secara berkelanjutan karena jika dihentikan batangan sampel akan mengalami *thermal shock* yang akan membuat batangan tersebut mudah patah. Tetesan hasil lelehan dari $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ dengan api las kemudian di-*quench* dalam *aquadest* pada wadah dibawahnya. Wadah penampungan tetesan lelehan tersebut dari logam *stainless*

steel. Karena terjadi *supercooling* tetesan aluminosilikat ini akan mengeras dan membentuk struktur glass dalam bentuk seperti manik (*droplet*) bening. *Droplet* Aluminosikat hasil *melt-quench* dengan air ini kemudian dihancurkan dalam mesin *milling* menjadi bentuk serbuk yang nantinya akan dipakai sebagai prekursor geopolimer. Hasil prekursor aluminosilikat ini kemudian dilakukan pengujian dengan karakterisasi XRD.

3.4 Pembuatan geopolimer

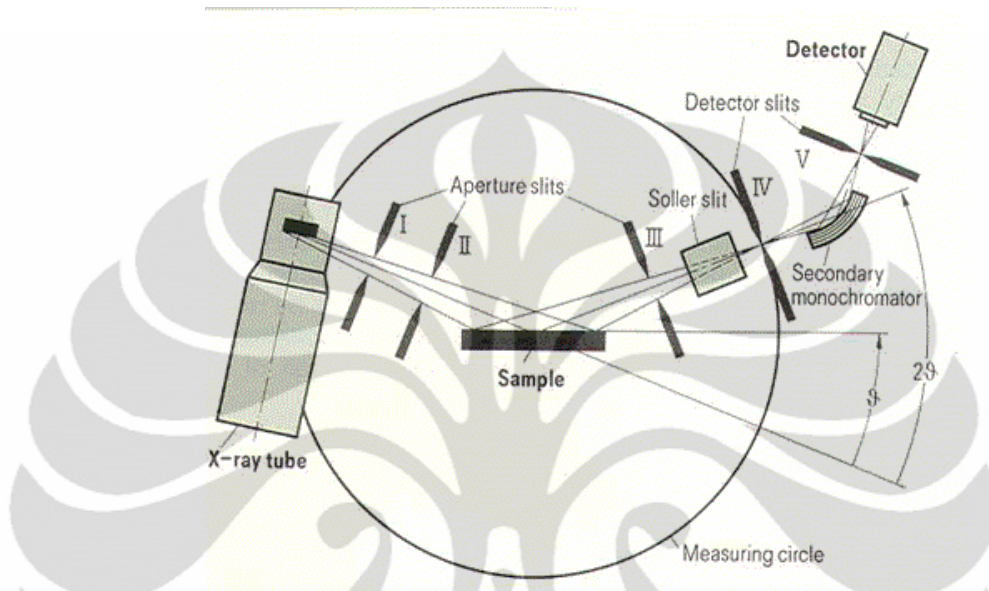
Droplet Aluminosikat hasil *melt-quench* dengan air ini kemudian dihancurkan dalam mesin *ball mill* putaran maksimum yaitu 540 rpm dan wadah serta bola penghancur dari alumina. *Milling* dilakukan untuk masing-masing jenis sampel selama 60 menit.

Serbuk dari Aluminosilikat tersebut kemudian akan direaksikan dalam medium alkali dimana akan terjadi reaksi geopolimerisasi menjadi geopolimer. Serbuk Aluminosilikat tersebut dicampurkan dengan *aquadest* dan diberi larutan alkali activator dan membentuk pasta geopolimer. Larutan *alkali activator* dicampurkan dengan komposisi molar ideal dengan perbandingan berat yaitu: Aluminosilikat : NaOH : Na₂SiO₃ = 50 : 11 : 44. Setelah prekursor direaksikan dengan alkali aktivator, akan tercipta pasta kemudian dimasukan kedalam cetakan dan dilakukan pemanasan dengan oven untuk proses *curing*. Pasta geopolimer itu akan mengalami *curing* pada suhu 90⁰C dalam waktu 24 jam. Untuk melihat seberapa besar struktur amorf dari masing masing variasi yang terbentuk, diamati dengan menggunakan instrument XRD pada saat sebelum digeopolimerisasi dan setelah digeopolimerisasi.

3.5 Pengujian XRD

Karakterisasi material dengan XRD adalah proses karakterisasi dengan menggunakan prinsip difraksi dengan sinar X yaitu sinar elektromagnetik dengan panjang gelombang 0,1 - 1000Å. Difraksi sinar X ini memberikan analisis terhadap struktur kristal, polikristal ataupun struktur amorf. Gambar 3.4 menggambarkan instrumensasi dari XRD. Sinar X ray ini didapat dari radiasi anode Cu. Pengujian ini menggunakan mesin XRD-7000 Diffractometer (Shimadzu)

pada tabung juga terdapat filter. Sampel uji dalam XRD yang digunakan biasanya dalam bentuk serbuk agar hasil difraksi lebih homogen dan representatif. Sinar X-ray ditembakkan pada sampel akan terhambur dan kemudian akan ditangkap oleh detektor germanium. sinar yang terukur kemudian menggunakan hukum Bragg dengan mengukur lebar celah.



Gambar 3.4 Instrumen XRD.

Pengukuran dilakukan setiap langkah pada dengan perpindahan sudut dari 10^0 – 90^0 dengan perpindahan setiap langkah sebesar 20. Nilai 20 diambil dari persamaan difraksi yaitu :

$$2\theta d = m \lambda$$

Informasi yang didapatkan dari karakterisasi XRD ini berupa:

- Posisi puncak difraksi yang menggambarkan tentang parameter kisi, struktur Kristal dan juga orientasi struktur Kristal
- Intensitas relative puncak difraksi yang menggambarkan posisi bidang dari satu unit Kristal, seperti bidang [111] yang memiliki intensitas yang paling tinggi.
- Lebar puncak dan bentuk puncak menggambarkan kondisi seperti ukuran partikel
- Pada sampel non-kristalin tidak akan terbentuk puncak pada hasil difraksi karena sinar X terhambur tidak koheren.

3.6 Pengujian Kuat Tekan

Geopolimer yang sudah memadat kemudian dilakukan pengujian kuat tekan pada masing-masing sampel. Masing-masing sampel berbentuk silinder dengan dimensi diameter 1, 2 cm dan tinggi 2, 4 cm. Pembebanan dilakukan mulai dari beban yang rendah hingga beban maksimum yang dapat diterima hingga sampel tersebut retak. Data yang didapat dari pengujian ini adalah beban maksimum (F_{max}) yang mampu diterima benda uji sebelum mengalami kegagalan. Kemudian untuk mengukur nilai kuat tekan dihitung dengan persamaan

$$\sigma \text{ (MPa)} = \frac{F \text{ (N)}}{A \text{ (mm}^2\text{)}}$$

σ = kuat tekan (Mpa)

F = beban maksimum (N)

A = luas permukaan sampel (mm²)

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Sampel Bahan

Dalam pembuatan sampel aluminosilikat dibuat dengan mencampur beberapa bahan utama dengan komposisi utama dari prekursor abu terbang yaitu SiO₂ dan Al₂O₃ dengan pengotor CaO dan MgO. Dengan komposisi abu terbang yang sesuai pada Tabel 4.1. Masing-masing bahan dikarakterisasi dengan menggunakan XRD untuk melihat puncak intensitas untuk mengidentifikasi material.

Tabel 4.1 Komposisi Abu Terbang kelas F ASTM 618.

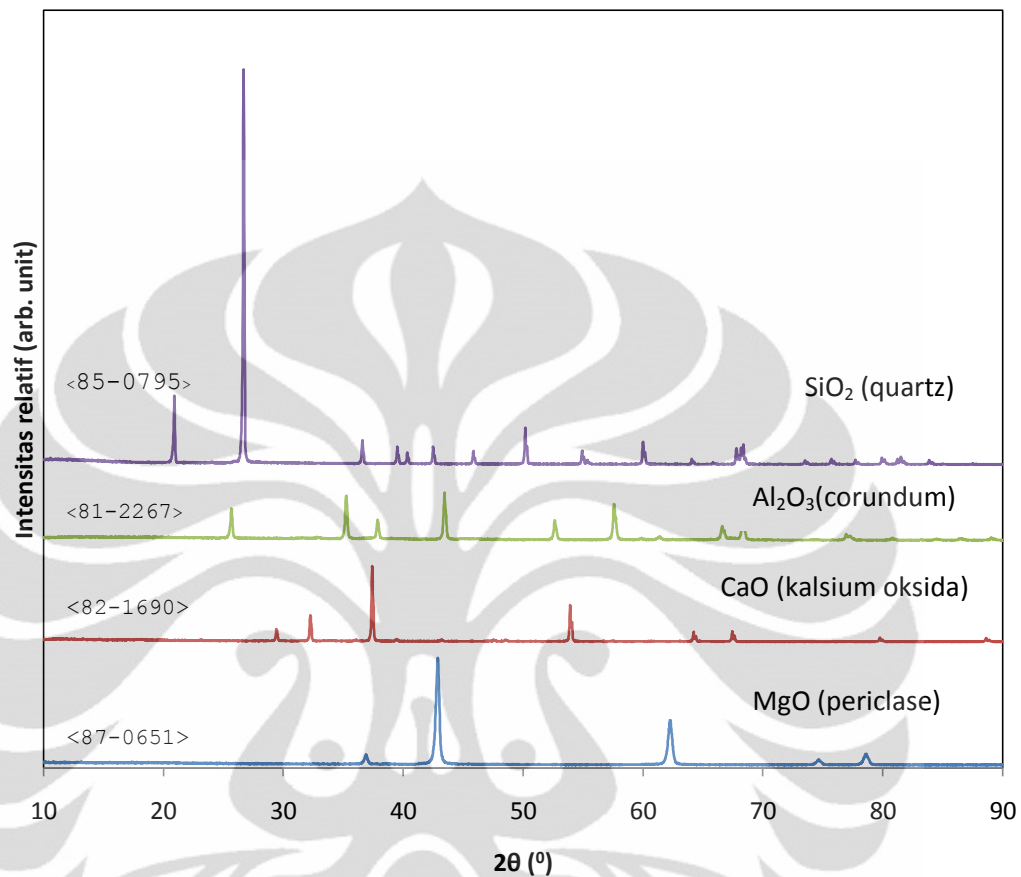
Komposisi kimia	% berat
SiO ₂	60
Al ₂ O ₃	32
CaO	6
MgO	2

Pada Gambar 4.1 memperlihatkan hasil pengujian XRD dari bahan sampel. Sampel SiO₂ dilakukan pengujian XRD dan memberikan identitas puncak yang cocok dengan material Quartz. sampel Al₂O₃ dilakukan pengujian XRD dan memberikan identitas puncak material Corundum. Sampel CaO dilakukan pengujian XRD dan memberikan identitas puncak dari material kalsium oksida. Tetapi pada puncak pertama bukanlah identitas dari CaO, dan dianalisa puncak 2θ 29 adalah identitas puncak dari CaCO₃. Adanya pengotor CaCO₃ dikarenakan dalam pembuatan CaO secara umum dengan cara termal dekomposisi dari material CaCO₃ pada suhu sekitar 800⁰C atau disebut proses kalsinasi. Dengan persamaan proses



Tetapi *quicklime* (CaO) yang dihasilkan tidak stabil dalam suhu rendah karena akan bereaksi secara spontan dengan CO₂ dapat dapat kembali menjadi CaCO₃. CaCO₃ diperkirakan terbentuk saat penghasulan bahan dari bentuk bongkah (*marble*) menjadi serbuk sehingga terbentuk sebagian kecil CaCO₃ yang diperlihatkan dengan puncak yang pendek dibandingkan puncak CaCO₃. Sampel

MgO dilakukan pengujian XRD dan memberikan identitas puncak yang cocok dengan material periclase.

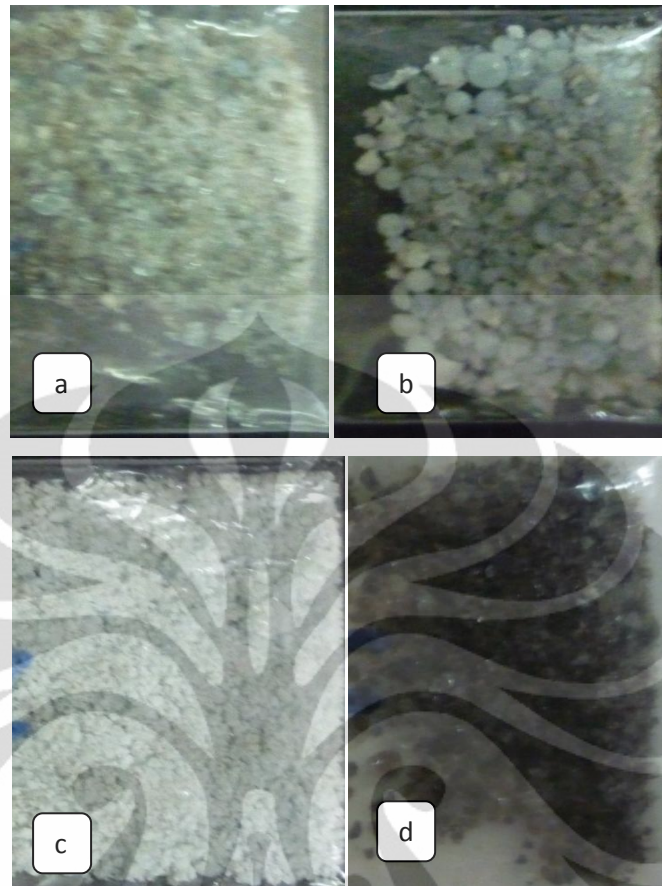


Gambar 4.1 Hasil pengujian XRD sampel SiO₂, Al₂O₃, CaO dan MgO.

4.2 Pengujian Prekursor

a. Pengujian XRD Prekursor

Dari semua hasil pembuatan prekursor sintetik dengan metode *melt-quench* dapat menghasilkan struktur yang berbeda beda setiap droplet (tetesan dari lelehan) yaitu butir yang sangat transparan (gelas), kristalin dan struktur semi kristalin yang buram. Struktur yang dihasilkan dari metode *melt-quench* tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kecepatan pendinginan dan suhu las *oxyacetylene*. Pada Gambar 4.2 memperlihatkan *droplet* yang dihasilkan dari *melt-quench*



Gambar 4.2 (a) droplet bening (b) droplet agak buram, (c) droplet buram (d) droplet hitam.

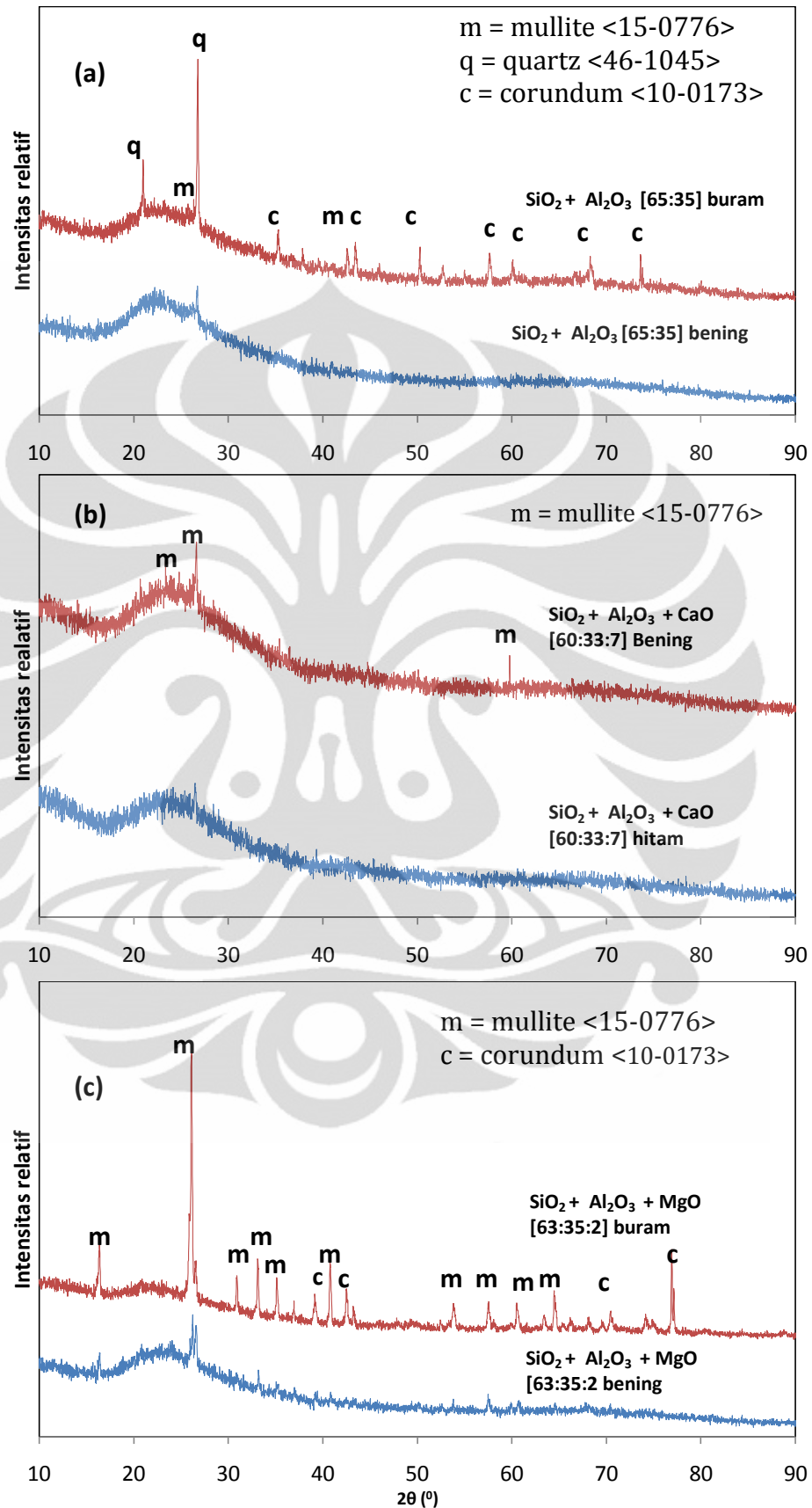
Droplet hitam diduga karena adanya pengotor ion Fe^{2+} yang menjadi *glass colorant* karena penumbukan CaO marble pada wadah besi. Hal utama yang menyebabkan tidak seragaman struktur dari *droplet melt-quench* yaitu dalam mengatur kecepatan pendinginan karena lelehan sampel aluminosilikat sangat mudah dan sangat cepat memadat diudara. Untuk itu untuk mendapatkan struktur gelas sempurna harus mengatur agar lelehan tidak sempat mengeras diudara dan langsung jatuh kedalam media *quenching* yaitu air.

Beberapa hal yang harus diperhatikan yaitu mengatur laju aliran (viskositas) lelehan agar tidak terlalu lama diudara dan juga ketinggian jatuhnya tetasan. Karena idealnya untuk mendapatkan struktur yang homogen *melt-quench* dilakukan dengan *electric furnace* atau *gas/oxygen-fuelled furnace* dibandingkan pelelehan dengan gas *oxyacetylene*.

Pada gambar 4.3 memperlihatkan hasil XRD dari *droplet* prekursor masing-masing prekursor. Pada *droplet* prekursor tanpa pengotor hasil proses *melt-quench* mempunyai struktur amorf yang transparan. Pada *droplet* tersebut terdapat puncak krsital SiO_2 dan juga beberapa puncak yang pendek dari krsital mullit. Sedangkan pada prekursor dengan struktur semi kristalin yang buram, memperlihatkan adanya kristalin SiO_2 (*Quartz Syn*). Dari proses *melt-quench* ini didapat SiO_2 dengan struktur sintetik quartz yang setara dengan proses pembuatan kristal quartz dengan proses hidrotermal (suhu dan tekanan tinggi) besarnya energi yang terperangkap saat pendinginan cepat sehingga menyerupai proses hidrotermal. Dan juga identitas puncak dari $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ (*Mullite Syn*). Dari perbandingan banyak dan ketinggian puncak kristalin terlihat SiO_2 dan Al_2O_3 yang paling banyak dan sebagian SiO_2 beraksi dengan Al_2O_3 membentuk *solid solution* yaitu mullit yang hanya sedikit yang ditunjukkan dengan pendeknya pucak utama mullit.

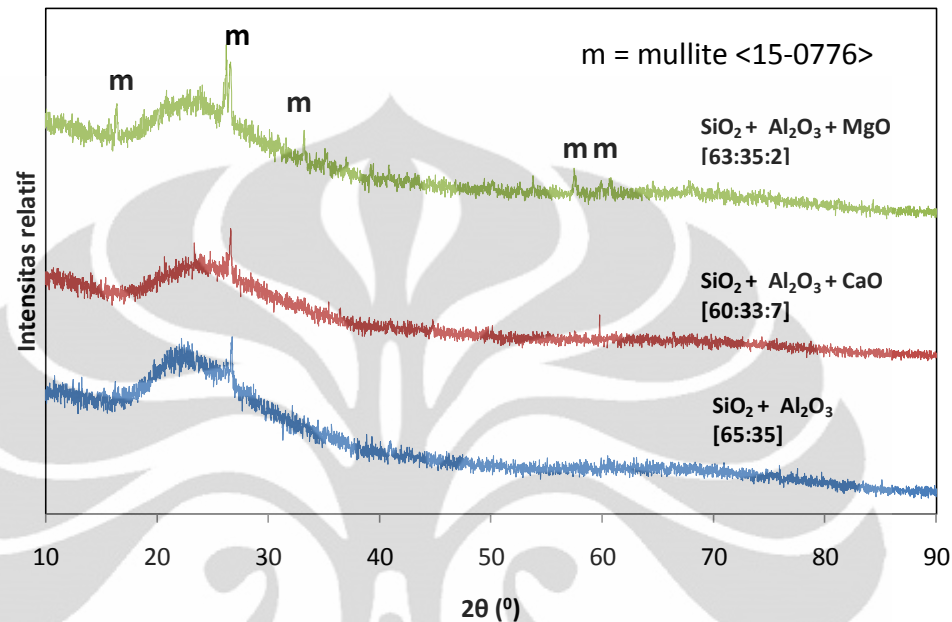
Pada sampel aluminosilikat dengan penambahan unsur pengotor CaO, sebagian ada yang menghasilkan *droplet* berwarna hitam dan juga *droplet* yang bening. Kedua jenis *droplet* ini kemudian dikarakterisasi menggunakan pengujian XRD. Masing-masing *droplet* memberikan hasil pengujian berupa struktur amorf (gelas). Pada kedua pengujian didapatkan sebagian kecil kandungan mullit kristalin dengan puncak mullit. Hal ini menunjukkan dalam proses *melt-quench* memasuki daerah *immiscibility* dimana SiO_2 dan Al_2O_3 menjadi gelas sempurna dan tidak teridentifikasi dengan struktur kristalin, Dimana *liquid_{SiO2}* dan *Liquid_{Al2O3}* yang tidak saling larut (*immiscible*) mengalami pendinginan cepat dan memasuki daerah metastabil yang tidak memungkinkan terjadinya *solid solution* (mullit). Sehingga membentuk fasa gelas yang kaya SiO_2 dan Al_2O_3 yang tidak saling larut.

Pada sampel aluminosilikat dengan penambahan pengotor MgO, *droplet* hasil pelelehan dengan metode *melt-quench* sebagian besar menghasilkan *droplet* yang bening dan *droplet* putih buram. pada hasil *droplet* dengan warna putih buram memiliki struktur kristalin dengan fasa mullit hal ini juga dari sisa dari Al_2O_3 yang berbetuk kristalin bukan gelas yang menunjukkan proses pendinginan kurang cepat sehingga terjadinya kristalisasi.



Gambar 4.3 Hasil pengujian XRD prekursor (a) tanpa kandungan pengotor, (b) dengan tambahan pengotor CaO, (c) dengan tambahan pengotor MgO.

Pada Gambar 4.4 memperlihatkan perbandingan antara prekursor amorf tanpa pengotor, dengan pengotor CaO dan MgO yang menghasilkan pola amorf yang serupa dengan beberapa puncak mullite.



Gambar 4.4 Perbandingan hasil XRD prekursor tanpa pengotor, dengan pengotor CaO dan prekursor dengan pengotor MgO

b. Perhitungan Kuantitatif Prekursor

Dari hasil pengujian XRD, kemudian dilakukan perhitungan kuantitatif prekursor dengan perbandingan hasil pengujian XRD. Dari setiap komposisi didapat hasil berupa perbandingan persentasi massa dari fasa. Perhitungan kuantitatif dihitung dengan menggunakan *software* MAUD (*Material Analysis Using Diffraction*). Pada Tabel 4.2 menunjukkan perhitungan persentasi massa dari setiap fasa pada prekursor. Pada prekursor bening terdapat fasa silika gelas yang sangat tinggi sedangkan pada prekursor yang buram kandungan silika gelas lebih rendah. Diagram perhitungan fasa dapat dilihat dilampiran.

Tabel 4.2 Hasil perhitungan kuantitatif persen massa prekursor

fasa	%massa SiO ₂ + Al ₂ O ₃ [65:35]	
	Bening	Buram
Corundum	-	3.4534907
Mullite	0.66479576	1.0025989
Quartz	1.9719694	3.933798
Silica Al Glass	-	0.013148257
Silica Glass	97.363235	91.59696
fasa	%massa SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + CaO [60:33:7]	
	Bening	Hitam
Corundum	-	-
Mullite	-	0.6259261
Quartz	1.1922281	1.2753599
Silica Al Glass	0.19590421	0.9635142
Silica Glass	98.61187	97.1352
fasa	%massa SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + MgO [63:35:2]	
	Bening	Buram
Corundum	0.7834225	0.9845519
Mullite	3.2678597	18.994438
Quartz	1.6808782	1.0099702
Silica Al Glass	0.26314685	0.826403
Silica Glass	94.00469	78.18464

4.3 Pengujian Geopolimer

Setelah pembuatan dari prekursor geopolimer, kemudian prekursor direaksikan dalam medium alkali yaitu dengan Natrium Silikat dan juga NaOH untuk membentuk Geopolimer. Setelah direaksikan dalam medium alkali kemudian dilakukan *curing* dan memadat.

a. Pengujian Kuat Tekan Geopolimer

Geopolimer yang sudah memadat kemudian dilakukan pengujian kuat tekan pada masing-masing sampel. Masing-masing sampel berbentuk silinder dengan dimensi sampel 1 dan 5 D=1,4cm, sampel 2 D=1,2cm, sampel 3 D=1cm dan sampel 4 D=8cm masing-masing komposisi dari sampel menghasilkan besar pengujian yaitu;

- | | | |
|----|---|----------|
| 1. | SiO ₂ + Al ₂ O ₃ (Amorf) | : 2500 N |
| 2. | SiO ₂ + Al ₂ O ₃ (Semikristalin) | : 1100 N |
| 3. | SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + CaO (Amorf) | : 2500 N |
| 4. | SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + MgO (Amorf) | : 1100 N |
| 5. | SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + MgO (Kristalin) | : 900 N |

Pengujian pada sampel kristalin yaitu untuk membandingkan nilai kuat tekan antara sampel dengan struktur amorf dan kristalin. Kemudian untuk mengukur nilai kuat tekan dihitung dengan persamaan

$$\sigma (MPa) = \frac{F(N)}{A (mm^2)}$$

Dengan hasil pengujian kuat tekan geopolimer pada Tabel 4.3 didapat nilai kuat tekan terbesar yaitu pada geopolimer dengan tambahan pengotor CaO hal ini menunjukkan peranan dari pengotor CaO dapat meningkatkan nilai dari kuat tekan dari geopolimer. Hal ini juga menunjukkan bahwa dengan adanya kandungan CaO dapat meningkatkan reaksi geopolimerisasi karena semakin baik reaksi geopolimerisasi maka akan membentuk struktur yang semakin kompleks (*rigid*) dan akan meningkatkan nilai dari kuat tekan geopolimer. Sedangkan geopolimer dengan penambahan pengotor MgO hanya sedikit mengalami peningkatan nilai kuat tekan dibandingkan dengan penambahan pengotor CaO.

Perbandingan nilai kuat tekan antara geopolimer dengan struktur amorf dengan struktur kristalin menunjukan geopolimer dengan struktur amorf memiliki nilai kuat tekan yang lebih besar dibandingkan dengan geopolimer dengan struktur yang lebih kristalin. Hal ini menunjukan prekursor dengan struktur amorf lebih reaktif dalam medium alkali dibanding dengan prekursor dengan struktur kristalin. karena lebih reaktif sehingga prekursor dengan struktur amorf akan

membentuk struktur yang lebih kompleks (*rigid*) dan menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih besar.

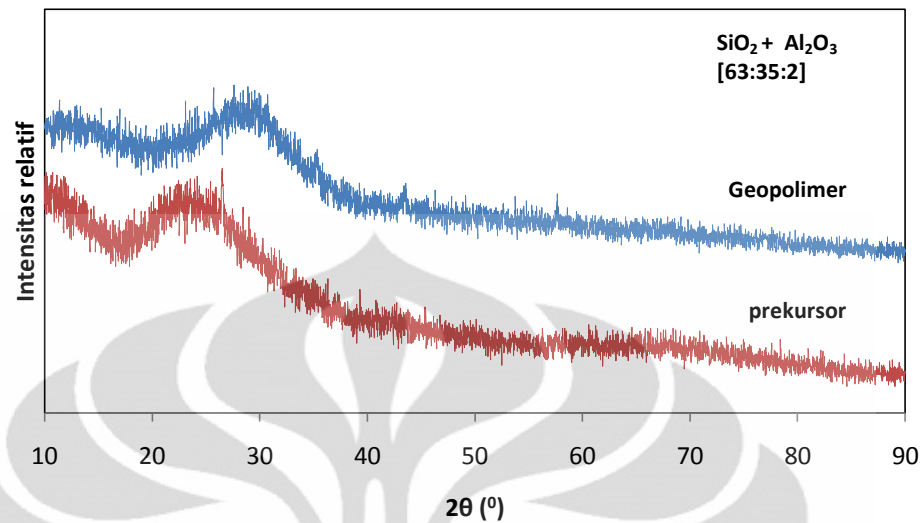
Tabel 4.3 Hasil pengujian kuat tekan geopolimer.

sampel	Nilai kuat tekan
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ (Amorf)	16.1 Mpa
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ (Semikristalin)	8,84 MPa
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + CaO (Amorf)	31,8 MPa
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + MgO (Amorf)	21,8 MPa
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + MgO (Kristalin)	5.95 Mpa

b. Pengujian XRD Geopolimer

Prekursor aluminosilikat yang direaksikan dalam medium alkali akan membentuk geopolimer. Dengan adanya unsur natrium atau potasium dalam ikatan rantainya, geopolimer ini membentuk suatu material dengan komposisi kimia yang sama dengan persenyawaan zeolit. prekursor yang sebelumnya amorf membentuk beberapa puncak kristal pada hasil pengujian XRD. Karena hasil pengujian XRD menunjukkan struktur amorf sehingga sangat sulit mendeteksi komposisi kimia didalamnya. Karena ada pula beberapa puncak yang tak terdeteksi karena besarnya noise pada grafi XRD. Sehingga beberapa analisa hanya menggunakan pendekatan dari beberapa puncak utama dari beberapa spesies zeolit, sedikitnya puncak kristal yang terbentuk juga memperlihatkan sebagian besar natrium aluminium silikat yang terbentuk memiliki struktur yang amorf. Pada Gambar 4.5 Perubahan pada posisi dari puncak lembah pada struktur amorf dari prekursor dengan geopolimernya juga menunjukkan perubahan fasa dalam dari prekursor ke geopolimer.

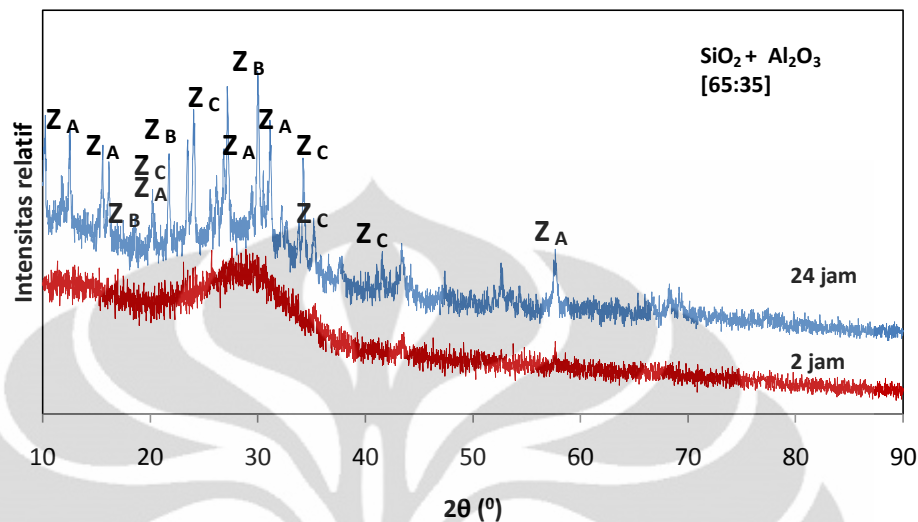
Dalam pengujian XRD Jika membandingkan posisi puncak lembah amorf dari prekursor dengan geopolimernya terdapat perubahan posisi yang signifikan hal ini menunjukkan terjadi perubahan fasa atau komposisi molekul dalam geopolimer. Sedangkan jika membandingkan posisi puncak lembah amorf pada sampel geopolimer terlihat sama dengan membentuk pola yang sama pada posisi yang berkisar sama. hal ini menunjukkan masing-masing geopolimer membentuk fasa yang sejenis.



Gambar 4.5 Perubahan posisi puncak lembah pada prekursor dan setelah direaksikan dalam medium alkali

Karena struktur yang terbentuk amorf dan sangat sulit untuk melihat spesies zeolit yang terbentuk maka dibandingkan pada prekursor dengan waktu *curing* yang lebih lama. Karena pasta geopolimer dengan waktu *curing* yang lebih lama akan terbentuk krsital zeolit yang lebih banyak sehingga dapat terlihat jelas spesies zeolit yang terbentuk. Kemudian dengan melihat kesamaan pada pola puncak lembah amorf dari diagram XRD dapat dipastikan geopolimer tersebut memiliki fasa yang sejenis. Pada Gambar 4.6 menunjukkan perbandingan antara pasta geopolimer dengan waktu *curing* 2 jam dan dengan pasta geopolimer dengan waktu *curing* selama 24 jam. Pada geopolimer dengan waktu *curing* 2 jam terlihat struktur dari geopolimer amorf sedangkan dengan waktu *curing* lebih lama menunjukkan pembentukan kristal zeolit yang cukup jelas. Beberapa spesies kristal zeolit yang ditemukan dalam pasta geopolimer dengan waktu *curing* 24 jam yaitu : *Sodium Aluminum Silicate* ($\text{Na}_{1,84}\text{Al}_2\text{Si}_{2,88}\text{O}_{9,68}$), *Sodium Aluminum Silicate hydrate* ($\text{Na}_4\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). Jika membandingkan pola puncak pola puncak lembah amorf dari masing-masing waktu *curing* berada pada kisaran posisi yang sama. Hal ini menunjukkan spesies zeolit pada masing-masing waktu *curing* adalah sama. Sehingga dapat memudahkan memperlihatkan spesies zeolit apa saja yang ada dalam geopolimer dengan struktur amorf yang sulit dianalisa.

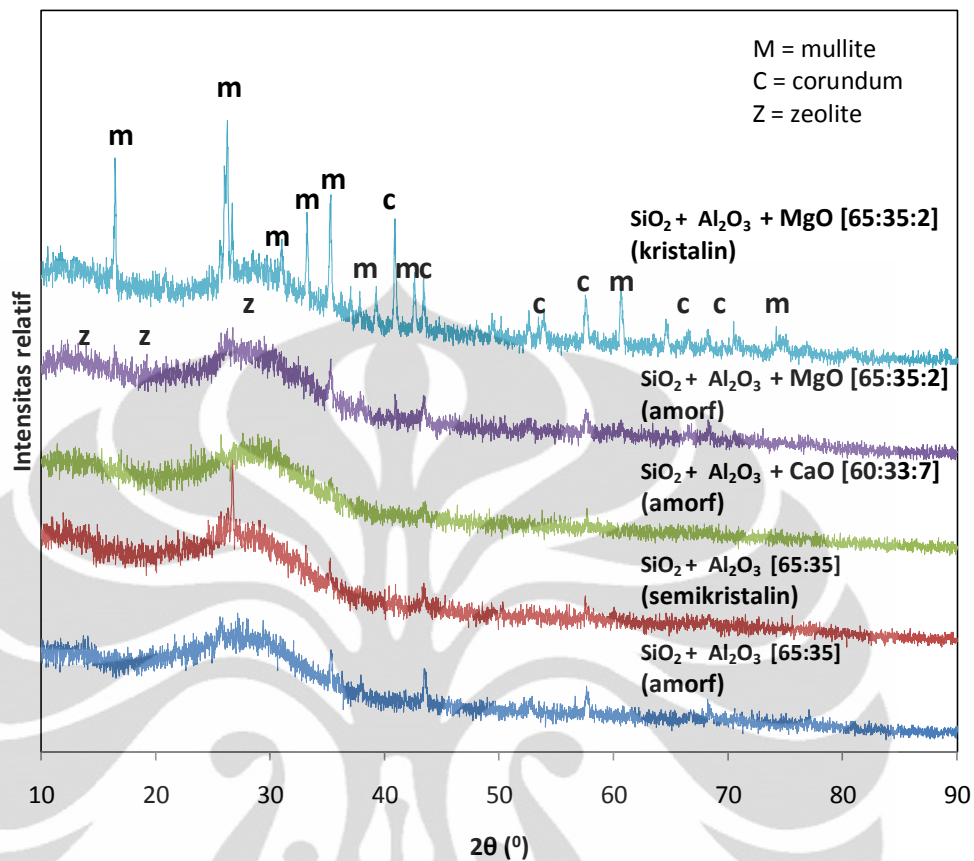
Z_A = Sodium aluminum silikat <48-0731>
 Z_B = Sodium aluminum silikat (hydrat) <44-0248>
 Z_C = Sodium aluminum silikat (hydrat) <47-0162>



Gambar 4.6 Perbandingan pengujian XRD dengan waktu *curing* 2 jam dan 24 jam yang menghasilkan pola puncak lembah pada kisaran posisi yang sama dan menunjukkan spesies zeolit yang sejenis.

Perbandingan nilai kuat tekan antara Geopolimer struktur kristalin mempunyai nilai kuat tekan 14.15 Mpa sedangkan geopolimer dengan struktur amorf mempunyai nilai kuat tekan 16.1 Mpa .

Pada Gambar 4.7 memperlihatkan hasil pengujian XRD dari geopolimer. Pada XRD Geopolimer Fly ash $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ Sampel asal dari prekursornya menunjukkan struktur semi kristalin dengan beberapa puncak kecil yang jelas. Setelah direaksikan dalam medium alkali menunjukkan hasil pengujian XRD yang lebih amorf dibandingkan prekursor hal ini menunjukkan saat *curing* dari geopolimer akan memberikan struktur yang amorf. Pada gambar 4.14 puncak pada 2θ 12.3, 17.8, 21.9, 28.3, dan 29.2 menunjukkan identitas dari spesies zeolit $\text{Na}_4\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ puncak XRD hampir tak yang hampir menyatu dengan noise memperlihatkan sebagian besar geopolimer yang terbentuk memiliki struktur amorf dan hanya sedikit terbentuk kristal zeolit. Sedangkan puncak tertinggi yaitu pada 2θ 26.6 menunjukkan puncak dari kristal SiO_2 dan Al_2O_3 yang tidak bereaksi dalam medium alkali sehingga masih membentuk beberapa puncak dalam reaksi XRD.



Gambar 4.7 Hasil Pengujian XRD pada sampel geopolimer.

Pada XRD Geopolimer Fly ash $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ Pada sampel prekursor dengan penambahan pengotor CaO yang direaksikan dalam medium alkali menghasilkan karakteristik pengujian XRD dengan struktur amorf dan sangat sulit melihat puncak karena noise yang terlalu besar.. pada Gambar 4.7 pengujian XRD memperlihatkan sedikit kristal zeolit yang terbentuk yaitu 2θ 15.5 menunjukkan puncak $\text{Na}_{1,84}\text{Al}_2\text{Si}_{2,88}\text{O}_{9,68}$, pada 2θ 24.1 menunjukkan puncak $\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ dan 2θ 12.3 menunjukkan puncak $\text{Na}_4\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Beberapa puncak yang terlihat jelas yaitu puncak dari kristal Al_2O_3 yang tidak bereaksi dalam medium alkali. Pada prekursor sebelumnya tidak terdeteksi adanya kristal dari Al_2O_3 hal ini diduga berasal pertikel alumina dari *alumina ball mill* yang tergerus saat dilakukan *milling*. Dan terdapat kristal mullit yang juga tidak bereaksi dengan medium alkali.

Pada XRD Geopolimer Fly ash $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ pada sampel prekursor dengan penambahan MgO (amorf) yang direaksikan dalam medium

alkali menghasilkan karakteristik pengujian XRD dengan struktur amorf dengan beberapa puncak kristal yang terlihat. Pada Gambar 4.7 memperlihatkan beberapa puncak kristal zeolit yaitu pada 2θ 14, 20.8, dan 24,1 yaitu puncak dari $\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ dan pada 2θ 29.2 yaitu puncak dari $\text{Na}_4\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. beberapa puncak yang jelas terlihat adalah puncak dari kristal Al_2O_3 yang tidak beraksi dalam medium alkali. Kristal Al_2O_3 sebelumnya tidak ada dalam prekursor hal ini diduga kristal Al_2O_3 berasal pertikel alumina dari *alumina ball mill* yang tergerus saat dilakukan *milling*.

Sedangkan pada pengujian prekursor krsitalin dengan penambahan pengotor yang direaksikan dalam medium alkali menghasilkan struktur karakteristik diagram XRD yang lebih amorf dibanding prekursornya yang lebih krsitalin. Pada Gambar 4.7 semua puncak hampir didominasi oleh kristal asal dari prekursor yaitu SiO_2 , Al_2O_3 dan kristal mullit karena kristal tersebut tidak ikut bereaksi dalam medium alkali. Karena didominasi oleh kristal tersebut sulit untuk melihat adanya krsital zeolit yang terbentuk juga sangat sedikit. Walaupun kristal tersebut tidak bereaksi tetapi terlihat jelas terjadi perubahan fasa dari prekursornya karena terjadi perubahan posisi puncak lembah dan puncak lembah yang terbentuk membentuk pola yang sama dengan fasa pada geopolimer yang lainnya yang menunjukkan adanya spesies zeolit yang terbentuk.

c. Perhitungan Kuantitatif Geopolimer

Dari hasil pengujian XRD, kemudian dilakukan perhitungan kuantitatif Geopolimer dengan perbandingan hasil pengujian XRD. Dari setiap komposisi didapat hasil berupa perbandingan fraksi berat dari fasa. Perhitungan kuantitatif dihitung dengan menggunakan *software* MAUD (*Material Analysis Using Diffraction*). Diagram perhitungan fasa dapat dilihat dilampiran. Pada Tabel 4.4 memperlihatkan hasil perhitungan kuantitatif dari fasa geopolimer dan terlihat bahwa pada prekursor dengan stuktur amorf yang mengandung silika gelas sangat tinggi kemudian setelah direaksikan dalam medium alkali berubah fasa menjadi silika aluminum gelas yang sangat tinggi. Sedangkan pada prekursor kristalin silika aluminum gelas yang dihasilkan lebih sedikit atau kurang reaktif dalam medium alkali.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan kuantitatif persen massa geopolimer dan perbandingannya dengan prekursor

fasa	%massa $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65:35]			
	Amorf		Kristalin	
	Prekursor	Geopolimer	Prekursor	Geopolimer
Corundum	-	6.987331	3.4534907	2.93195
Mullite	0.66479576	0.7981058	1.0025989	1.0305654
Quartz	1.9719694	0.0567283	3.933798	-
Silica Al Glass	-	91.900955	0.013148257	68.33788
Silica Glass	97.363235	0.25688297	91.59696	27.699602
fasa	%mass $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ [60:33:7]			
	Amorf Bening		Amorf Hitam	
	Prekursor	Geopolimer	Prekursor	Geopolimer
Corundum	-	1.4192156	-	1.4192156
Mullite	-	0.46094015	0.6259261	0.46094015
Quartz	1.1922281	0.2825014	1.2753599	0.2825014
Silica Al Glass	0.19590421	97.76306	0.9635142	97.76306
Silica Glass	98.61187	0.074281685	97.1352	0.074281685
fasa	%massa $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ [63:35:2]			
	Amorf		Kristalin	
	Prekursor	Geopolimer	Prekursor	Geopolimer
Corundum	0.7834225	2.7890372	0.9845519	5.024797
Mullite	3.2678597	3.6818967	18.994438	22.917706
Quartz	1.6808782	0.8387036	1.0099702	1.4325283
Silica Al Glass	0.26314685	90.81141	0.826403	49.44632
Silica Glass	94.00469	1.8789545	78.18464	21.178648

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pengolahan data yang diperoleh serta analisa yang dilakukan berdasarkan landasan teori dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. *Droplet* prekursor yang transparan memiliki struktur amorf (gelas) sedangkan prekursor yang putih buram memiliki struktur kristalin
2. Struktur dari prekursor ditentukan dari kecepatan pendinginan dari *melt-quench* semakin cepat pendinginan akan didapat struktur gelas (amorf)
3. Prekursor dengan penambahan pengotor CaO dan MgO memiliki karakteristik pengujian XRD yang sama dengan prekursor tanpa pengotor.
4. Semakin lama waktu *curing* pasta geopolimer cenderung terbentuk spesies kristal zeolit.
5. Prekursor dengan penambahan pengotor CaO dan MgO lebih reaktif dengan meningkatkan nilai kuat tekan geopolimer.

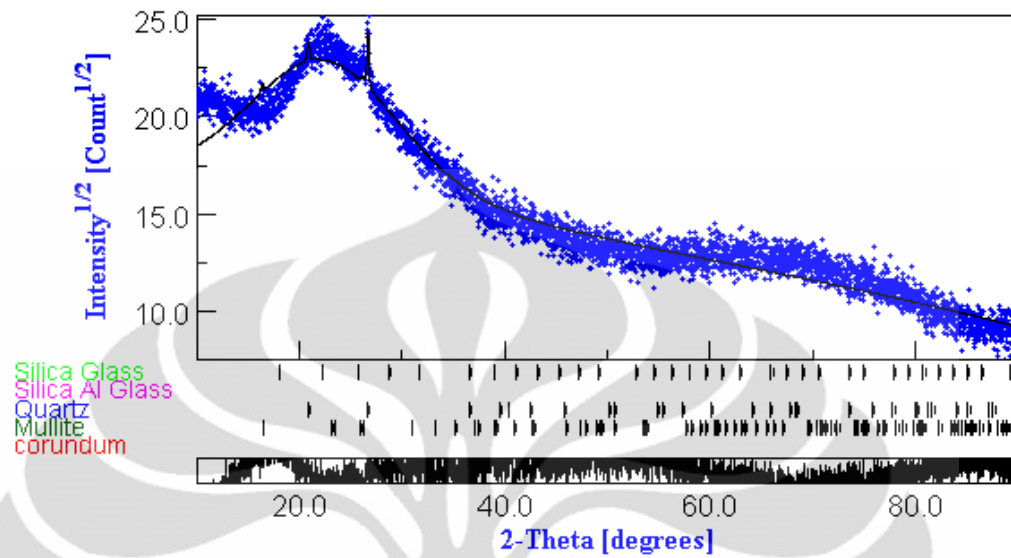
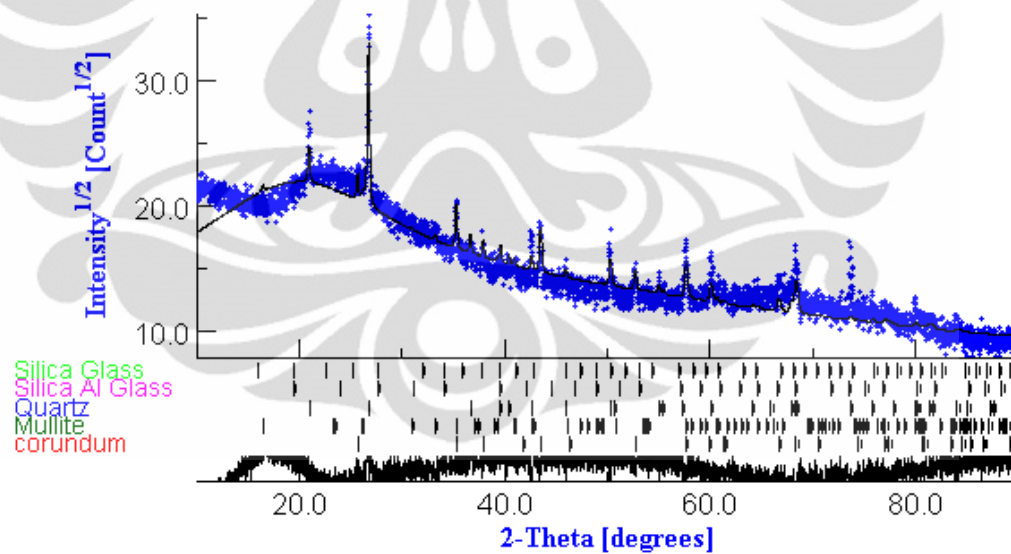
DAFTAR PUSTAKA

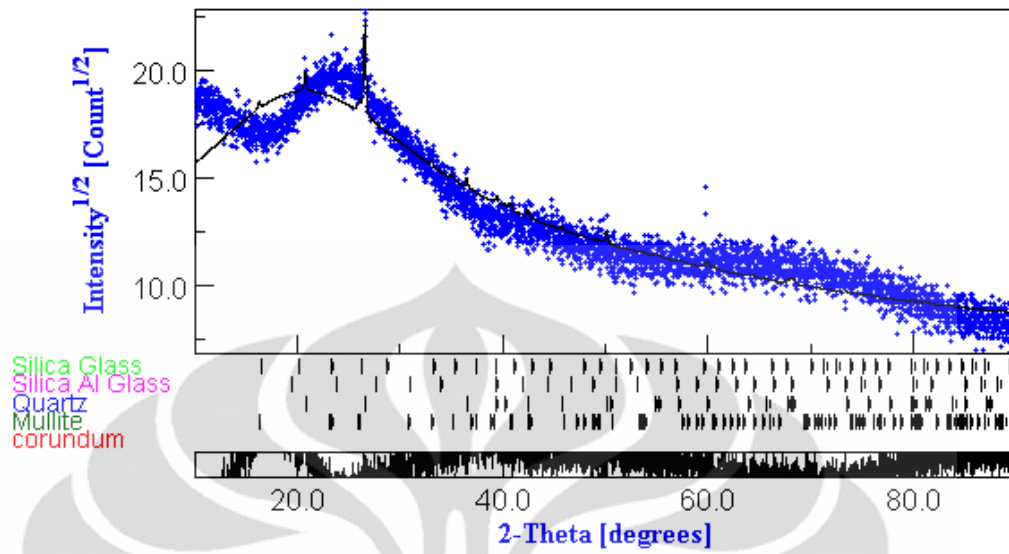
- [1] Davidovits, Joseph. (2008). *Geopolymer : Chemistry and Application 2nd edition*. Institut Géopolymère. pp. 19-34, 59-65, 111-120.
- [2] Davidovits, Joseph. (1994). *Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industry*, Institut Géopolymère. World Resource Rivew, Vol 6, No.2, pp.263-278.
- [3] E Hermann, C Kunze, R Gatzweiler, G Kiebig, J Davidovits. (1999) “*Solidification of Various Radioactive Residue by Geopolymer with Spesial Emphasis on Long-Term Stability*” Institut Géopolymère.
- [4] Richard E. Lyon, Usman Sorathia, P.N Balaguru and A. Foden, J davidovits and M davidovics. (1996). “*Fire Respon of Geopolimer Structural Composite*” ICCT’96, Tuscon, Arizona.
- [5] International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference, “*Géopolymère Composite™*” .
- [6] Balaguru P, Kurtz Stephen, Rudolph John, Rutgers. (1997) “*Geopolymer-Carbon Composite for Repair and Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams*” The State University of New Jersey, USA.
- [7] Duxson Peter , Provis John L. (2008) . “*Designing Precursors for Geopolymer Cements*”, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Victoria 3010, Australia.
- [8] Astutiningsih Sotya, Yinong Liu. (2006) *Synthetic Alumina Silica Glass for Geopolymer Precursor*, International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, Thailand.
- [9] Giannopoulou Ioanna, Panias Dimitrios. (2007) “*Structure, Design and Applications of Geopolymeric Materials*”, School of Mining and Metallurgical Engineering National Technical University of Athens, Greece.
- [10] H. Wan, Z. Shui, and Z. Lin. (2004). “*Analysis of Geometric Characteristics of GGBS Particles and their Influences on Cement Properties,*” *Cement and Concrete Research* Vol 34, Issue 1.pp.133-137.

- [11] W. K. W. Lee and J. S. J. van Deventer. (2004). “*Structural Reorganisation of Class F Fly Ash in Alkaline Silicate Solutions,*” Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects Vol 211, Issue 1, pp.49-66
- [12] Shi, P. V. Krivenko, and D. M. Roy. (2006) “*Alkali-Activated Cements and Concretes.*” Taylor & Francis, Abingdon, UK.
- [12] J. Pera. (2001). “*Metakaolin and calcined clays*”, Cement and Concrete Composites Vol. 23, Issue 6. Pages 441-454.
- [13] I. Lecomte, C. Henrist, M. Liégeois, F. Maseri, A. Rulmont, R. Cloots. (2006). “*(Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement*”, Journal of the European Ceramic Society Vol.26, Issue 16, pp.3789-3797.
- [14] D.M. Roy. (1999). “*Alkali-activated cements: opportunities and challenges*”, Cement and Concrete Research Vol.29, Issue 2, pp 249-254
- [15] P. Z. Wang, R. Trettin, and V. Rudert. (2005). “*Effect of Fineness and Particle Size Distribution of Granulated Blast-Furnace Slag on the Hydraulic Reactivity in Cement Systems,*” Advances in Cement Research, Vol.17, Issue 4, pp.161 –167.
- [16] Yip Christina K., Lukey Grant C., Provis John L., Jannie S.J. van Deventer. (2007). “*Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation*”, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Melbourne, Victoria 3010, Australia.
- [17] S. Song, H.M. Jennings. (1999). “*Pore solution chemistry of alkali-activated ground granulated blast-furnace slag*”, Cement and Concrete Research Vol.29, Issue 2, Pages 159-170.
- [18] J. F. Stebbins and Z. Xu. (1997). “*NMR Evidence for Excess Non-Bridging Oxygen in an Aluminosilicate Glass,*” Department of Materials Science and Engineering, Stanford University, Stanford, California. USA.
- [19] S. K. Lee and J. F. Stebbins. (2006). “*Disorder and the Extent of Polymerization in Calcium Silicate and Aluminosilicate Glasses: O-17 NMR Results and Quantum Chemical Molecular Orbital Calculations,*” Geochimica et Cosmochimica Acta Volu.70, Issue 16, pp.4275-4286

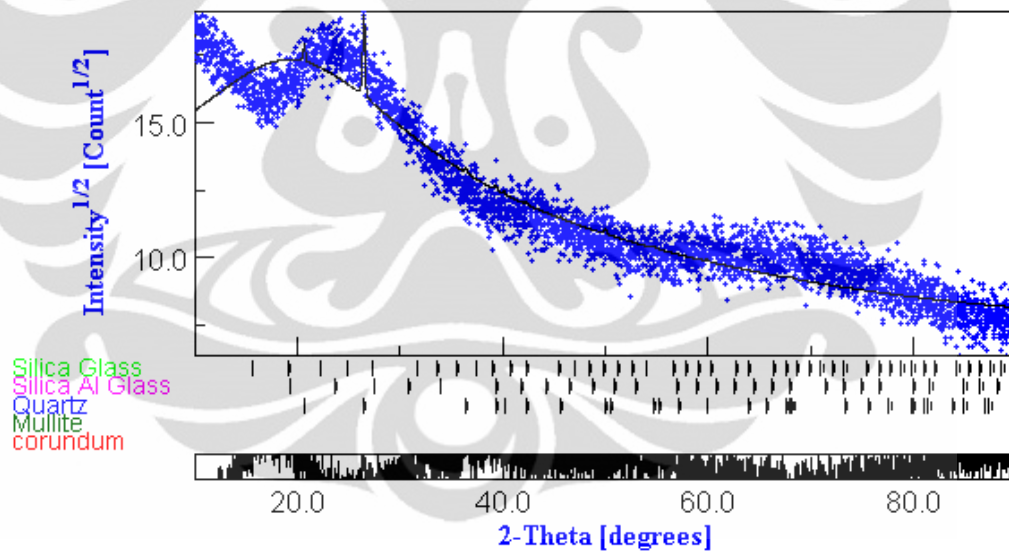
- [20] W.K.W. Lee, J.S.J. van Deventer. (2002). “*The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements*”, Cement and Concrete Research Vol.32, Issue 4, pp.577-584
- [21] The Chemical and Thermodynamic Equilibrium Calculator (CatCalc) Ver1.0, AIST, Japan.
- [22] F.A. Hummel. (1984). “*Introduction to Phase Equilibria in Ceramic Systems*”, Taylor & Francis Inc, New York. pp.100-133
- [23] Risbud, S. H. (1976) “*Metastability and crystallization studies in the silica-alumina system*”. Ph.D. Thesis California Univ., Berkeley. Lawrence Berkeley Lab.
- [24] MTDATA – Phase Diagram Software from the National Physical Laboratory, “SiO₂-Al₂O₃ phase diagram” (<http://mtdatasoftware.tech.officelive.com/dgox2.htm>) diakses pada tanggal 1 juli 2011.
- [25] Ojovan M.I. (2008). “*Configurons: thermodynamic parameters and symmetry changes at glass transition*”, Department of Engineering Materials, The University of Sheffield .
- [26] Carter, C. Barry, Norton, M. Grant. (2007). “*Ceramic Material : Science and engineering*”, Springer. Pp.120-134, 379-387, 412-413, 427-430.
- [28] Wiyono Denny Eko. (2006). “*Pembuatan keramik alumina dengan proses slip casting*”, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra http://dewey.petra.ac.id/jiunkpe_dg_4325.html

LAMPIRAN

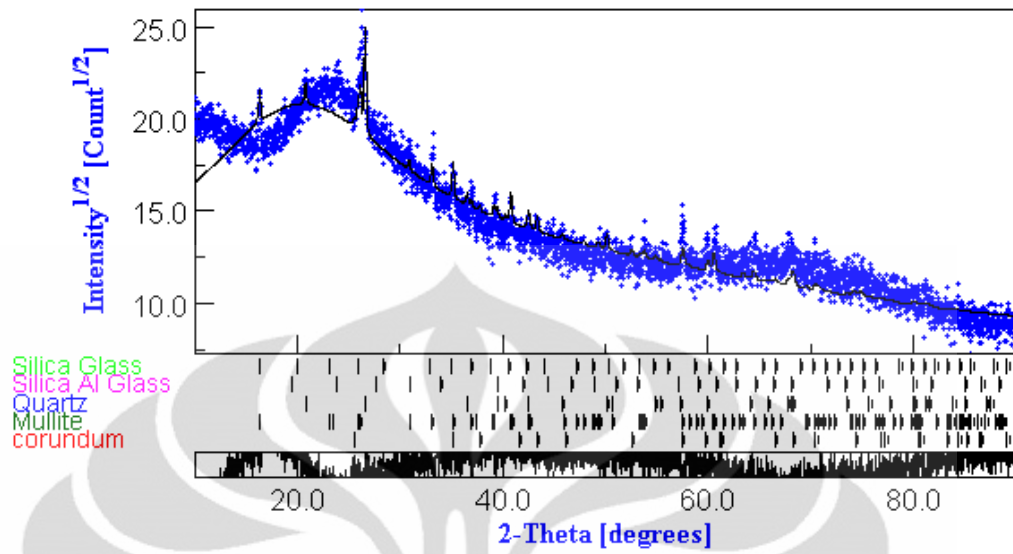
Lampiran 1. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65:35] bening.Lampiran 2. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65:35] buram.



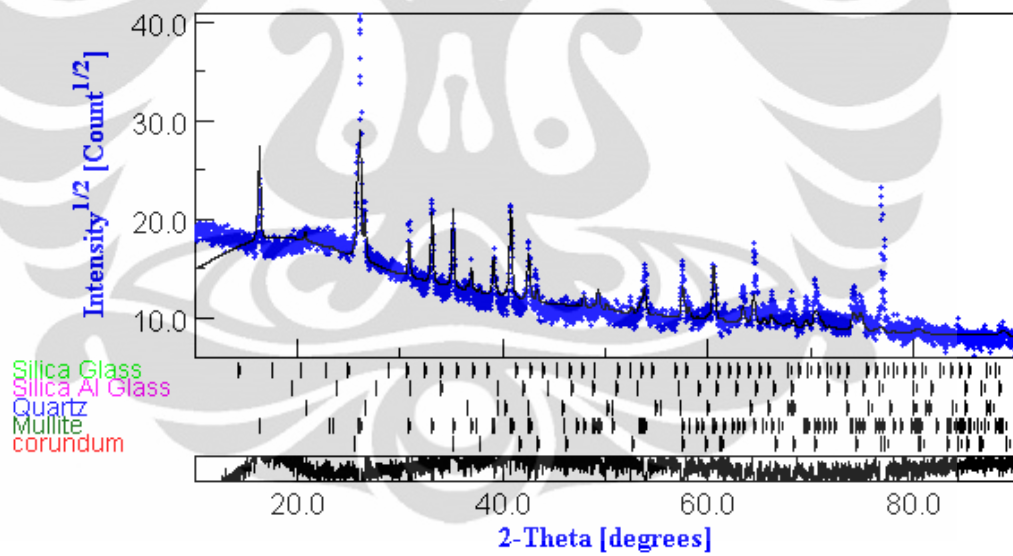
Lampiran 3. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ [60:33:7] bening.



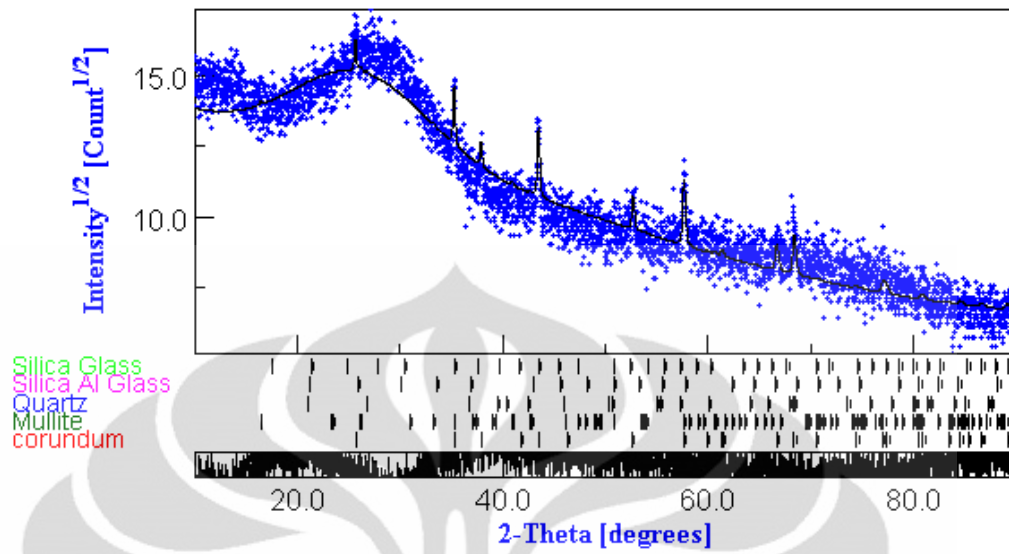
Lampiran 4. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ [60:33:7] bening.



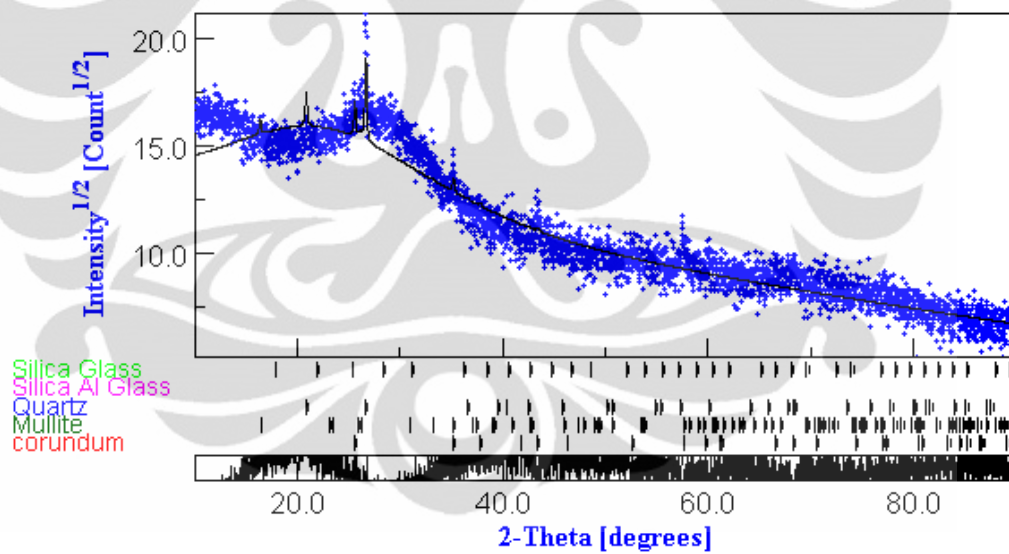
Lampiran 5. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ MgO}$ [65:33:2] bening.



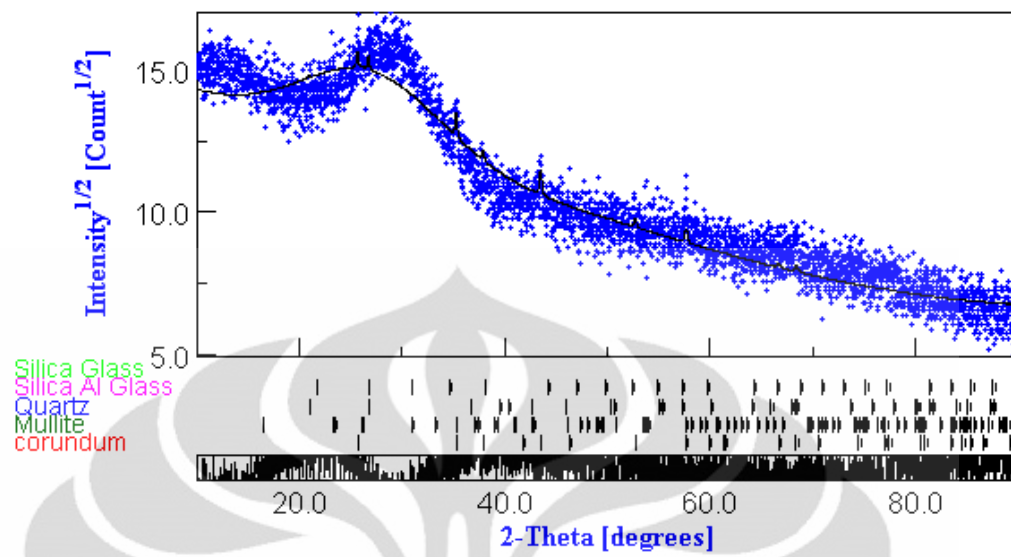
Lmpiran 6. Diagram perhitungan kuantitatif Prekursor $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ MgO}$ [65:33:2] buram.



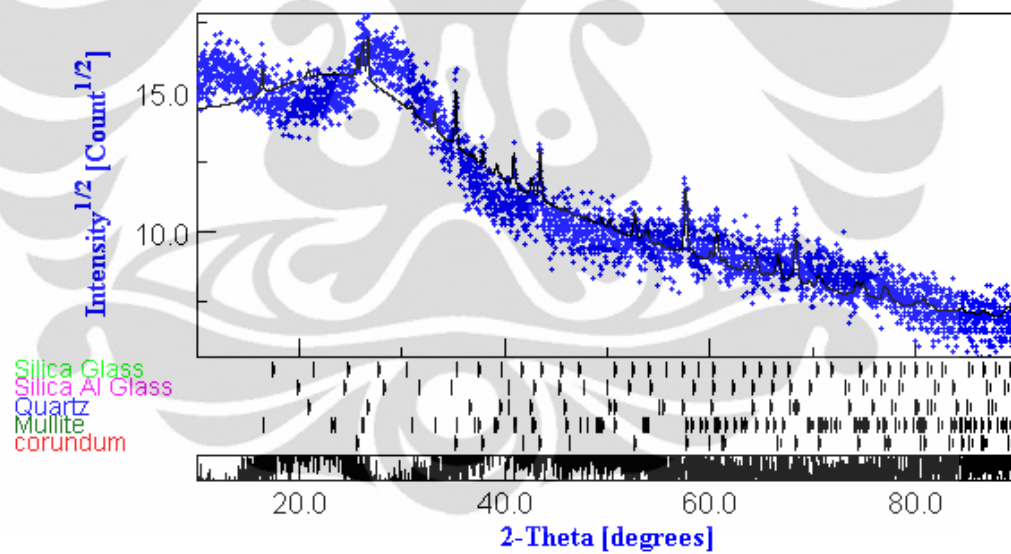
Lampiran 7. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65:35] amorf.



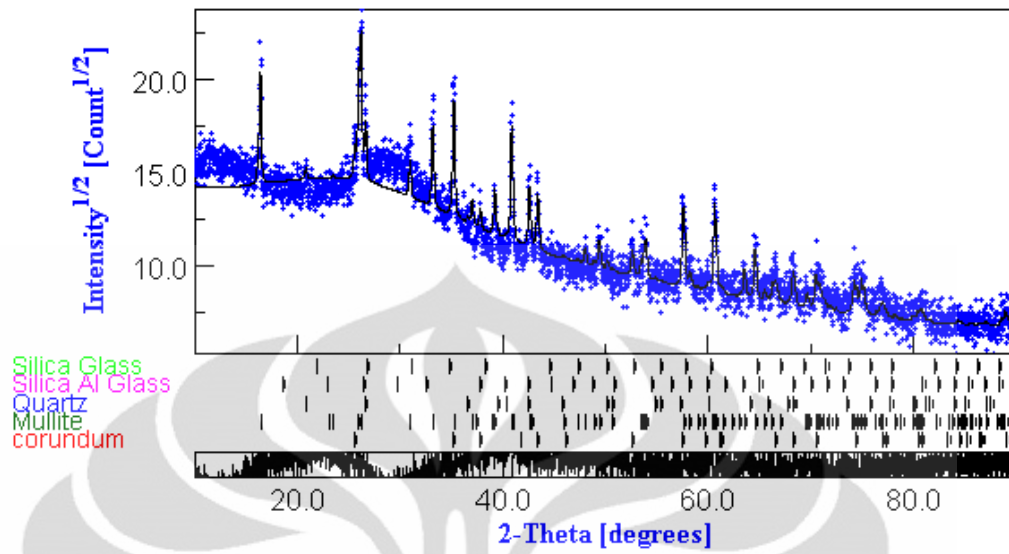
Lampiran 8. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [65:35] semikristalin.



Lampiran 9. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ [60:33:7] amorf.



Lampiran 10. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ [65:33:2] amorf.



Lampiran 11. Diagram perhitungan kuantitatif Geopolimer $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ [65:33:2] kristalin.