



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS METAKAOLIN DAN ABU TERBANG SEBAGAI
PREKURSOR GEOPOLIMER**

SKRIPSI

**UMAR SIDIK
0706268934**

**DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS METAKAOLIN DAN ABU TERBANG SEBAGAI
PREKURSOR GEOPOLIMER**

SKRIPSI

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

**UMAR SIDIK
0706268934**

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

**DEPOK
JANUARI 2012**

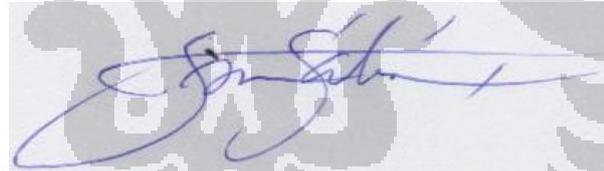
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : UMAR SIDIK

NPM : 0706268934

Tanda Tangan :



Tanggal : 24 Januari 2012

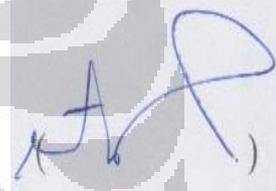
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Umar Sidik
NPM : 0706268934
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Sintesis Metakaolin dan Abu Terbang
sebagai Prekursor Geopolimer

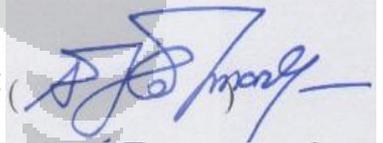
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

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

Puji syukur kepada Allah S.W.T saya panjatkan dan resapi dalam hati dengan sesadar mungkin atas selesainya penyusunan skripsi ini untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik. Skripsi ini disusun dengan penuh keriang dan semangat pantang menyerah, laiknya seorang manusia yang berusaha dengan penuh gairah untuk menghasilkan salah satu mahakarya dalam hidupnya. Saya sadari bahwa penyusunan skripsi ini tak akan selesai dengan indah pada waktunya tanpa dorongan serta bantuan dari berbagai pihak dan fenomena yang selalu memberikan pewahyuan inspirasi maha dalam.

Seperti seorang anak yang selalu merasa berhutang budi kepada orang tuanya, jikalau ada ungkapan yang lebih tinggi dari sekedar 'terima kasih' akan saya sampaikan dengan segala kepatantasan dan kerendahan hati kepada :

1. Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng. atas kesediaan beliau menyediakan waktu, materi, dan pikiran sebagai dosen pembimbing tugas akhir.
2. Dr. Ir. Akhmad Herman Yuwono M.Phil.Eng dan Nofrijon Sofyan, Ph.D. atas kesedian beliau menyediakan waktu dan pikiran sebagai dosen penguji tugas akhir.
3. Dr. Ir. Winarto M.Sc selaku dosen peming akademis dan segenap dosen yang telah membantu serta memberikan perhatian selama masa perkuliahan.
4. Segenap karyawan dan *staff* Departemen Teknik Metalurgi dan Material yang telah banyak membantu dalam pengerjaan tugas akhir dan selama masa perkuliahan.
5. Kennedi sebagai sahabat dan rekan dalam pengerjaan tugas akhir.
6. Orang tua serta keluarga, saudara, dan sahabat yang telah banyak memberikan dorongan dan bantuan dalam penyusunan tugas akhir ini.
7. Rekan-rekan akademisi seluruh Departemen Teknik Metalurgi dan Material yang telah banyak membantu selama masa perkuliahan dan penyelesaian tugas akhir ini.
8. Teman-teman metal 07 yang selalu ada disamping saya kapan dan dimana pun dibutuhkan. Yang tak pernah berhenti menyegarkan suasana dengan *jokes*

yang tanpa toleransi. Yang jumlahnya terlalu banyak untuk saya sebutkan satu-persatu.

9. Winnetou, yang meskipun hanya tokoh rekaan karya Karl F. May, caranya menjalani hidup menginspirasi banyak orang di dunia, termasuk saya sendiri. Winnetou !
10. Friederich Nietzsche, yang hidupnya sendiri begitu tragis namun dijalannya dengan semangat apollonian dan dionysian seperti kisah-kisah pementasan tragedi Yunani dari era Aeschylus dan Sophocles, yang baginya sendiri adalah obat kuat dalam memerangi semangat zaman kebudayaan Eropa yang bobrok. Seorang filsuf-pujangga dan pujangga-filsuf yang paling mahsyur. Yang pemikirannya selalu menimbulkan paradoks bagi orang-orang, yang puisi-puisi karyanya selalu menyegarkan saat diresapi bersama secangkir kopi hangat dan rokok berkualitas.
11. Leo Tolstoy, yang karya-karyanya akan terus inspiratif hingga zaman anak-cucu kita nanti.
12. Led Zeppelin, Jimi Hendrix, Janis Joplin, Bob Dylan, Joan Baez dkk, yang lagu-lagunya selalu menemani saya ketika harus berhadapan dengan laptop untuk menyusun skripsi ini.
13. Dan tidak lupa, Cece yang selalu menyediakan sarapan ekonomis di departemen, sehingga mahasiswa dapat membeli sejumlah kalori untuk beraktivitas dengan harga yang relatif murah.

Skripsi ini berjudul '**Sintesis Metakaolin dan Abu Terbang sebagai Prekursor Geopolimer**'. Somoga dengan segala kekurangan yang ada, skripsi ini dapat memberikan secerah pengetahuan serta wawasan dalam bidang ilmu pengetahuan dan kehidupan.

Depok, 24 Januari 2012

Penulis

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

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

Nama : Umar Sidik
NPM : 0706268934
Program Studi : Sarjana
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

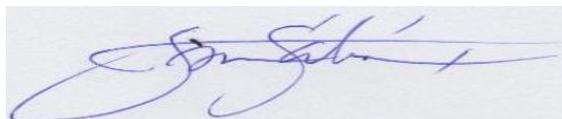
Sintesis Metakaolin dan Abu Terbang sebagai Prekursor Geopolimer

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 : 24 Januari 2012

Yang menyatakan



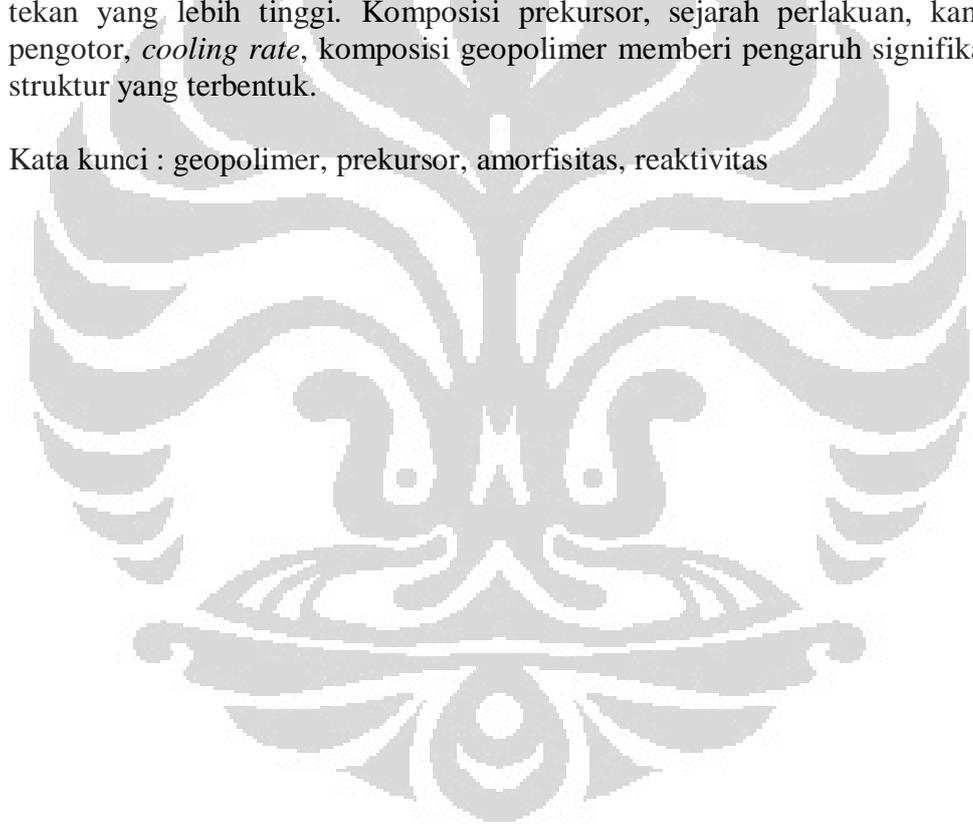
(Umar Sidik)

ABSTRAK

Nama : Umar Sidik
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Sintesis Metakaolin dan Abu Terbang sebagai Prekursor Geopolimer

Geopolimer sebagai *filler* dapat digunakan sebagai semen instan yang ramah lingkungan dalam proses reparasi jalan beton. Sampel prekursor sintetis geopolimer dihasilkan melalui metode *melt-quench*. Analisa melalui XRD dan uji kuat tekan dilakukan untuk mengetahui perbandingan amorfisitas antara prekursor metakaolin sintetis, prekursor abu terbang *class F* sintetis, prekursor metakaolin alami, dan prekursor abu terbang *class F* alami dalam lingkup pengaruhnya terhadap reaktivitas geopolimer dalam medium alkali. Sampel dengan struktur prekursor dan struktur geopolimer yang lebih amorf memiliki reaktivitas dan kuat tekan yang lebih tinggi. Komposisi prekursor, sejarah perlakuan, kandungan pengotor, *cooling rate*, komposisi geopolimer memberi pengaruh signifikan pada struktur yang terbentuk.

Kata kunci : geopolimer, prekursor, amorfisitas, reaktivitas

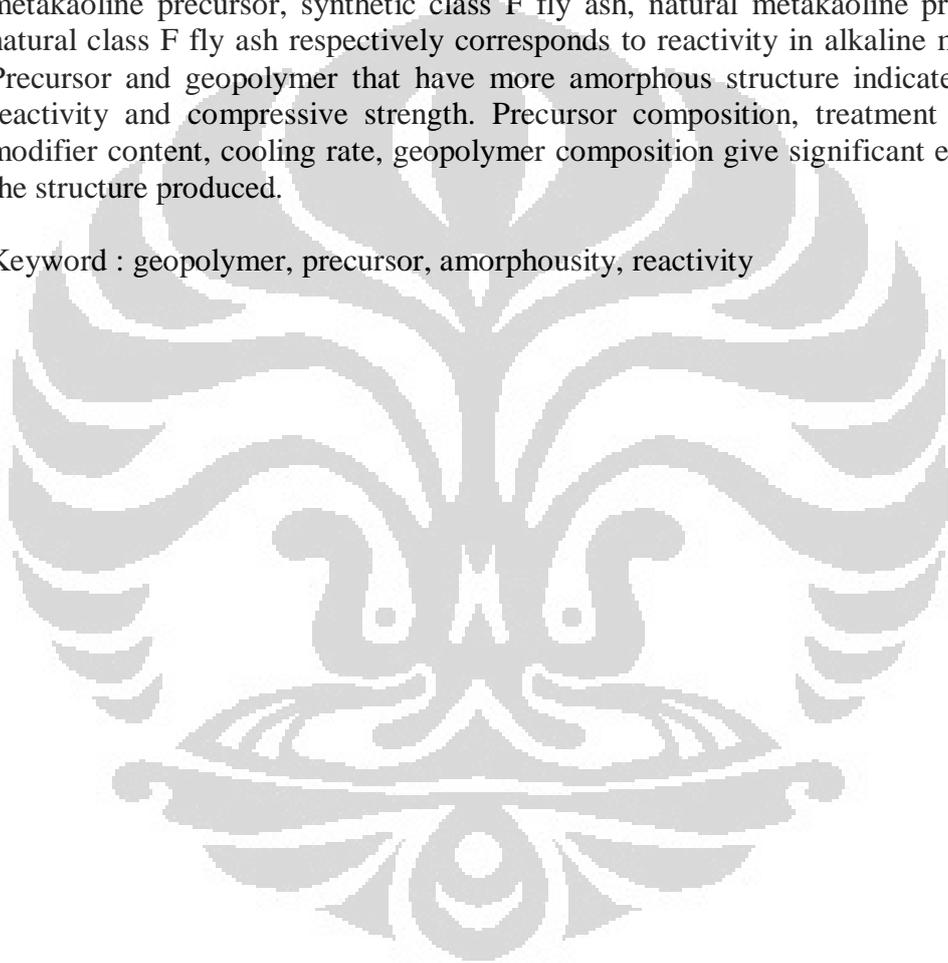


ABSTRACT

Name : Umar Sidik
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : Synthesis Of Metakaoline and Fly Ash as Geopolymer Precursor

Geopolymer as filler can be used in repairing the concrete road for its characteristic as environment friendly instant cement. Synthetic geopolymer precursor was made by melt-quench method. XRD and compressive strength test have been done in order to analyzing the amorphousity comparison of synthetic metakaoline precursor, synthetic class F fly ash, natural metakaoline precursor, natural class F fly ash respectively corresponds to reactivity in alkaline medium. Precursor and geopolymer that have more amorphous structure indicate higher reactivity and compressive strength. Precursor composition, treatment history, modifier content, cooling rate, geopolymer composition give significant effect on the structure produced.

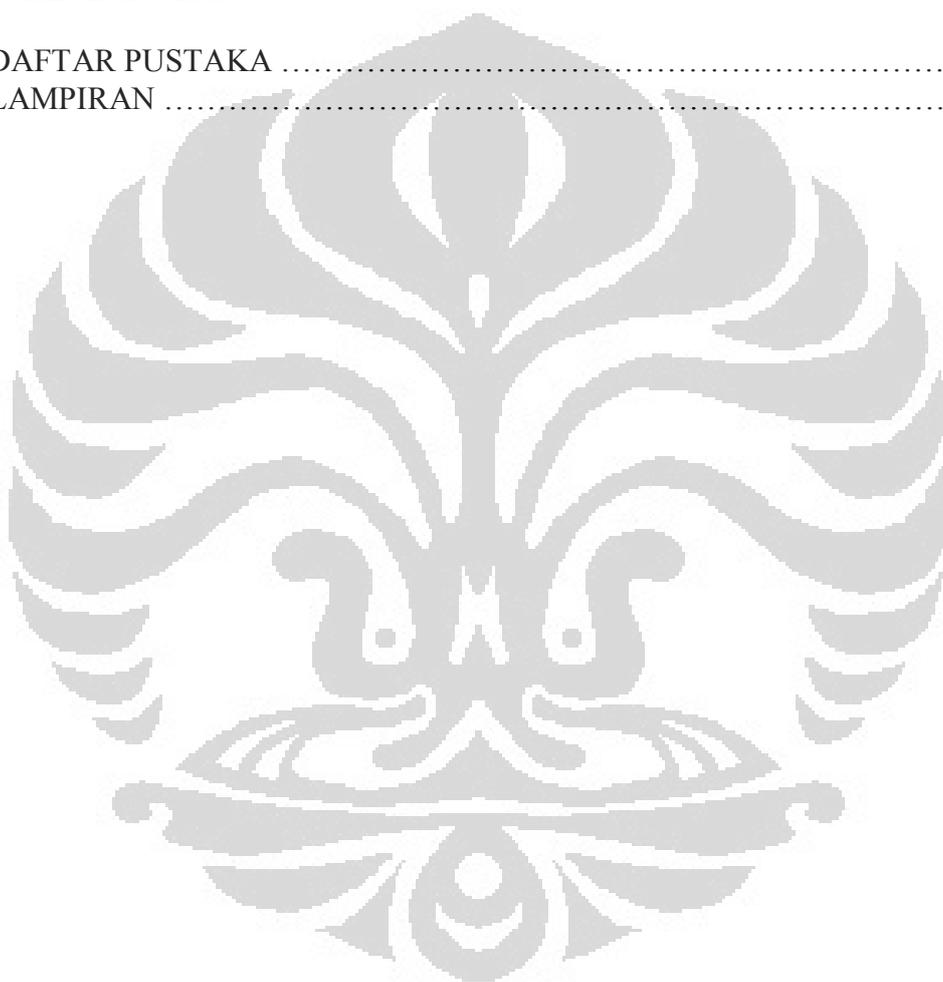
Keyword : geopolymer, precursor, amorphousity, reactivity



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xi
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.....	6
2. DASAR TEORI.....	8
2.1 Material Geopolimer.....	8
2.2 Kaolin.....	10
2.3 Abu Terbang.....	12
2.4 Larutan Alkali Aktivator dan Reaksi Polimerisasi.....	15
3. METODOLOGI PENELITIAN.....	17
3.1 Diagram Alir.....	17
3.2 Alat dan Bahan.....	18
3.2.1 Peralatan.....	18
3.2.2 Bahan Baku.....	23
3.3 Komposisi.....	28
3.3.1 Komposisi Prekursor Geopolimer.....	28
3.3.1.1 Kaolin.....	28
3.3.1.2 Abu Terbang <i>Class F</i>	29
3.3.2 Komposisi Pasta Geopolimer.....	29
3.3.2.1 Geopolimer Dari Prekursor Metakaolin Sintetis.....	29
3.3.2.2 Geopolimer Dari Prekursor Abu Terbang Sintetis.....	29
3.4 Pembuatan Campuran Prekursor, <i>Slip Casting</i> , dan <i>Sintering</i>	29
3.5 Proses <i>Melt-Quench</i>	30
3.6 Pembuatan Geopolimer.....	31
3.7 Karakterisasi.....	32
3.7.1 XRD.....	32
3.7.2 Uji Kuat Tekan.....	32

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Pembuatan Campuran Prekursor, <i>Slip Casting</i> , dan <i>Sintering</i>	34
4.2 Proses <i>Melt-Quench</i>	37
4.2.1 Karakterisasi Sampel Prekursor <i>Melt-Quench</i>	40
4.2.1.1 Pengujian XRD	40
4.3 Pembuatan Geopolimer	46
4.3.1 Karakterisasi Sampel Geopolimer.....	48
4.3.1.1 Pengujian XRD	48
4.3.1.2 Pengujian Kuat Tekan	55
5. KESIMPULAN	58
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN	64



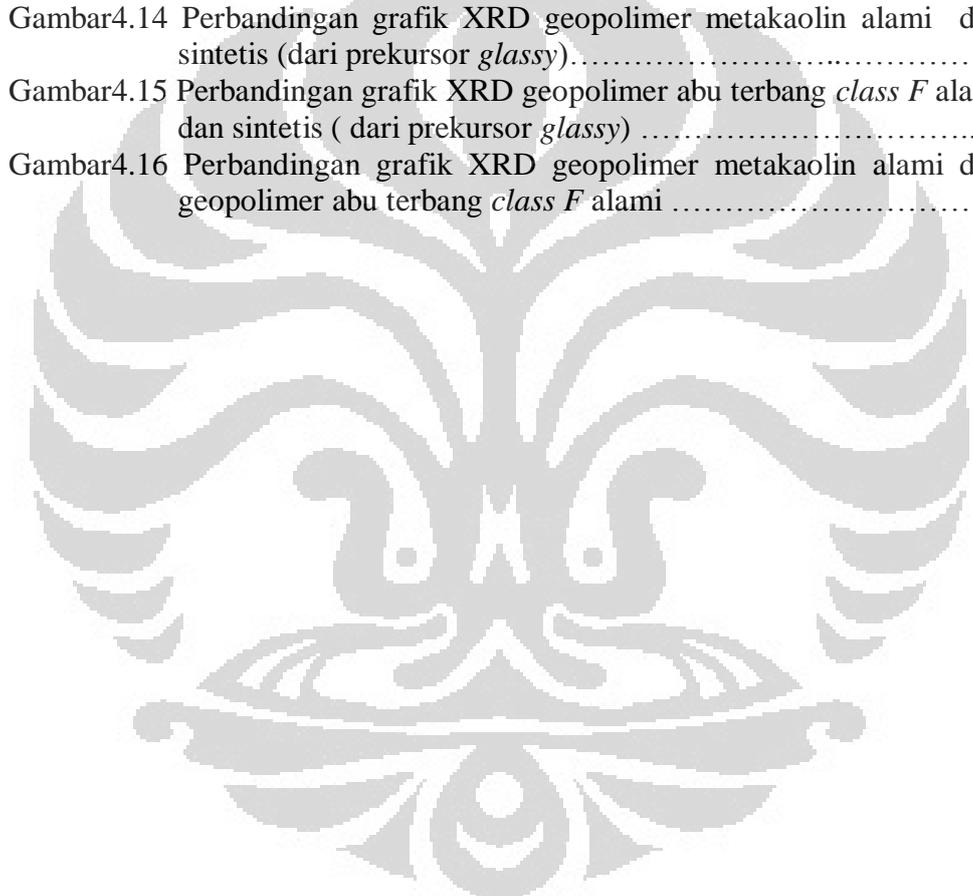
DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Estimasi kenaikan atau penurunan biaya produksi pada beberapa jenis semen	5
Tabel 2.1 Komposisi kimia abu terbang berdasarkan jenis batu bara asal	13
Tabel 2.2 Sifat kimia dan fisika abu terbang berdasarkan ASTM C 618	14
Tabel 4.1 Nilai kuat tekan sampel geopolimer prekursor alami... ..	55
Tabel 4.2 Nilai kuat tekan sampel geopolimer prekursor sintetis	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Jumlah emisi gas CO ₂ yang dihasilkan dari proses produksi semen Portland selama tahun-tahun tertentu pada beberapa negara	2
Gambar 2.1 Jumlah semen yang dapat dihasilkan dengan batas pelepasan emisi CO ₂ sebesar 100 g untuk setiap oksida CaO, Na ₂ O, K ₂ O	8
Gambar 2.2 Struktur jenis-jenis <i>polysialate</i>	9
Gambar 2.3 Kaolin	10
Gambar 2.4 Penguraian ion prekursor menjadi monomer	16
Gambar 2.5 Proses polikondensasi	16
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	17
Gambar 3.2 Cetakan <i>gypsum</i>	18
Gambar 3.3 Timbangan digital	18
Gambar 3.4 Oven nabertherm	19
Gambar 3.5 <i>Blender</i>	19
Gambar 3.6 Las <i>ocy-acetylene</i>	20
Gambar 3.7 Wadah besi	20
Gambar 3.8 <i>Planetary ball mill</i>	21
Gambar 3.9 Selang air	21
Gambar 3.10 Mesin XRD-7000 Diffractometer (Shimadzu)	22
Gambar 3.11 Mesin uji kuat tekan	22
Gambar 3.12 Mortar dan alu	23
Gambar 3.13 <i>Alumina powder (ALCOA) 99,7%</i>	23
Gambar 3.14 <i>Silika Flour 99,5%</i>	24
Gambar 3.15 CaO 99,5%	24
Gambar 3.16 MgO 99,5%	25
Gambar 3.17 Dispex	25
Gambar 3.18 Aquadest	26
Gambar 3.19 Paris plester / <i>gypsum</i>	26
Gambar 3.20 <i>Talc</i>	27
Gambar 3.21 Natrium silikat (Na ₂ SiO ₃)	27
Gambar 3.22 Natrium hidroksida (NaOH)	28
Gambar 4.1 Prekursor hasil <i>slip casting</i>	35
Gambar 4.2 <i>Casting slip</i>	35
Gambar 4.3 Prekursor setelah di <i>sintering</i>	36

Gambar 4.4	<i>Droplets</i> hasil proses <i>melt-quench</i>	38
Gambar 4.5	Perbandingan grafik XRD SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO.....	40
Gambar 4.6	Perbandingan hasil XRD prekursor metakaolin <i>melt-quench</i> ...	41
Gambar 4.7	Perbandingan hasil XRD prekursor abu terbang <i>class F melt-quench</i>	43
Gambar 4.8	Perbandingan hasil XRD prekursor metakaolin dan abu terbang <i>class F melt-quench</i>	44
Gambar 4.9	Diagram fasa Al ₂ O ₃ -SiO ₂ menunjukkan wilayah <i>metastable immiscibility</i> (garis putus-putus)	45
Gambar 4.10	Geopolimer dalam cetakan	47
Gambar 4.11	Geopolimer setelah <i>curing</i>	47
Gambar 4.12	Hasil XRD sampel geopolimer metakaolin sintetis	49
Gambar 4.13	Hasil XRD sampel geopolimer abu terbang sintetis	50
Gambar4.14	Perbandingan grafik XRD geopolimer metakaolin alami dan sintetis (dari prekursor <i>glassy</i>).....	52
Gambar4.15	Perbandingan grafik XRD geopolimer abu terbang <i>class F</i> alami dan sintetis (dari prekursor <i>glassy</i>)	53
Gambar4.16	Perbandingan grafik XRD geopolimer metakaolin alami dan geopolimer abu terbang <i>class F</i> alami	54



BAB 1

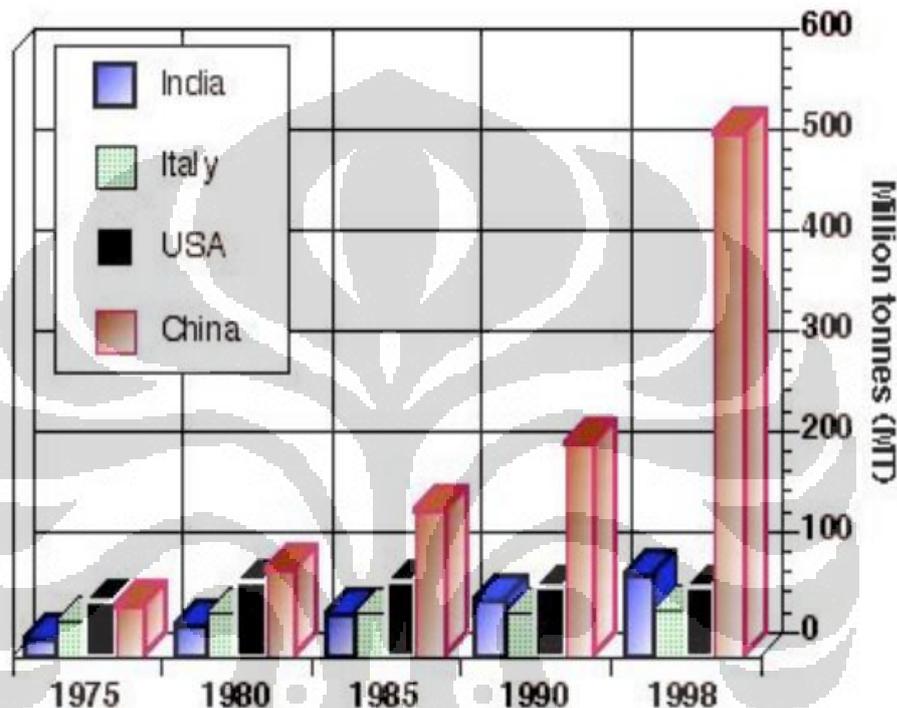
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini masyarakat dapat menikmati akses cepat mobilisasi dan informasi melalui berbagai sarana dan teknologi yang dibangun melalui industri-industri berbasis energi. Pengembangan teknologi ini tak hanya memberikan keuntungan yang dapat langsung dirasakan oleh masyarakat luas, namun di sisi lain juga turut menyumbangkan berbagai dampak negatif terhadap kehidupan bermasyarakat dewasa ini, khususnya dalam hal kelestarian lingkungan. Kegiatan bermobilisasi kini dapat dengan mudah dilakukan dengan adanya pengembangan dalam sistem transportasi dan infrastruktur yang semakin maju. Salah satu infrastruktur makro yang dalam hal ini keberadaannya tak dapat tergantikan lagi adalah jalan raya. Dalam membangun jalan raya dapat digunakan aspal sebagai material dasarnya, namun ketika kebutuhan akan pembangunan jalan dengan ruas-ruas yang sibuk dan memiliki beban transportasi yang berat, orang akan lebih menentukan pilihannya pada pembangunan jalan beton. Secara umum, jika dihitung biaya pembangunan, perawatan, dan rekonstruksi, jalan beton memiliki biaya yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan jalan aspal [1]. Hal ini dikarenakan harga aspal akan meningkat berbanding lurus dengan harga minyak dunia, sehingga biaya pembangunan jalan beton akan lebih kompetitif dan memiliki *lifecycle costs* yang lebih rendah. Selain itu juga dengan pembangunan yang semakin cepat maka kebutuhan infrastruktur jalan beton akan semakin meningkat dengan semen Portland sebagai pengikat antar agregatnya. Kebutuhan ini memacu produksi semen Portland dunia terus meningkat setiap tahunnya. Dalam proses produksinya, semen Portland menghasilkan residu berupa emisi gas CO₂ yang dapat memacu efek gas rumah kaca dan pemanasan global. Emisi gas CO₂ ini dihasilkan melalui proses kalsinasi *limestone* (CaCO₃) dan pembakaran batubara. Reaksi kalsinasi limestone dan material alumino-silika sebagai berikut :



Untuk dapat menghasilkan 1 ton semen Portland akan dihasilkan emisi gas CO₂ sebesar 1 ton. Angka ini menunjukkan kontribusi produksi semen Portland yang sangat besar terhadap konsentrasi CO₂ di atmosfer dibandingkan dengan aktivitas manusia yang lain, seperti sektor transportasi. Berikut ini adalah diagram batang yang menunjukkan jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan selama tahun-tahun tertentu oleh beberapa negara produsen semen Portland dunia :



Gambar 1.1 Jumlah emisi gas CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi semen Portland selama tahun-tahun tertentu pada beberapa negara [2]

Gambar 1.1 menunjukkan jumlah emisi gas CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi semen Portland selama tahun-tahun tertentu pada beberapa negara. Selain itu para ahli juga memperkirakan bahwa jumlah emisi gas CO₂ yang dihasilkan oleh produksi semen akan mencapai angka 3500 juta ton pada tahun 2015 [2]. Oleh karena itu, untuk mereduksi jumlah emisi CO₂ yang dihasilkan melalui produksi semen dunia, kini para pengembang mulai menggunakan semen alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan semen Portland. Semen yang disebut-sebut sebagai *green material* ini mulai dikembangkan dengan memanfaatkan reaksi geopolimerisasi dan mulai dikenal

sebagai semen geopolimer. Sebagai perbandingan, produksi 1 ton semen geopolimer hanya akan menghasilkan 0.184 ton CO₂ dari pembakaran bahan bakar batubara, sehingga emisi gas CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi semen geopolimer adalah 5-6 kali lebih sedikit dibandingkan dengan CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi semen Portland [2].

Semen geopolimer tak hanya dapat diaplikasikan pada pembangunan jalan saja, namun juga mencakup bidang sipil dan konstruksi. Selain lebih ramah lingkungan, semen ini juga memiliki keunggulan lain yang sangat menguntungkan dalam kaitannya dengan aplikasi dibidang konstruksi dan infrastruktur. Semen ini dapat mencapai kekuatan optimum dalam waktu yang relatif lebih singkat selama proses pengerasan yang dipengaruhi suhu. Sebagai contoh, semen campuran Pyrament (salah satu jenis semen geopolimer yang dimulai diperkenalkan pada tahun 1988) dapat mencapai nilai kuat tekan 20 MPa setelah pengerasan beton selama 4 jam sementara semen konvensional membutuhkan waktu selama beberapa hari. Dalam aplikasinya pada pembangunan landasan pesawat, nilai di atas cukup menahan beban pendaratan *Airbus* atau *Boeing* [3]. Contoh lain dalam bidang *aerostructure* adalah material ini dapat berperan sebagai matriks dengan penguat *carbon fiber* yang membentuk *geo-composite*. Material ini biasa digunakan untuk kabin pesawat dan memiliki ketahanan suhu yang lebih baik dibandingkan komposit *carbon fiber-reinforced* dengan matriks polimer termoset lainnya [3].

Geopolimer dapat disintesis dari bahan dasar yang mengandung silika dan alumina dengan menambahkan aktifator yang umumnya dipakai adalah basa kuat. Bahan dasar ini dapat berasal dari alam (*ex: kaoline*) ataupun dari limbah sisa pembakaran industri (*ex: fly ash*). Sintesis geopolimer dari abu terbang (*fly ash*) akan jauh lebih menguntungkan sebab selain memanfaatkan limbah sisa industri akan dihasilkan pula material yang lebih ramah lingkungan.

Abu terbang (*fly ash*) merupakan material sisa pembakaran industri-industri berbasis energi yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. Industri-industri seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap, pabrik semen, pabrik kertas dan lain-lain adalah sumber penghasil abu terbang dalam jumlah yang sangat besar. Pada tahun 2005, dilaporkan bahwa industri energi dengan bahan

bakar batu bara memproduksi 71,1 juta ton abu terbang namun hanya 29,1 juta ton saja yang sudah digunakan dalam berbagai aplikasi [4]. Pesatnya perkembangan industri berbasis energi yang tak tergantikan ini meninggalkan sejumlah permasalahan serius karena abu terbang yang dihasilkan mengandung logam-logam berat yang signifikan jumlahnya. Abu terbang yang sebagian besar komposisinya terdiri dari silika dan alumina memiliki potensi untuk dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, namun abu terbang ini telah dikategorikan sebagai limbah yang mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), sehingga tidak diperkenankan dibuang tanpa pengolahan dahulu. Logam-logam berat yang terkandung dalam abu terbang seperti Fe, Mn, Zn dan Cr telah mempersulit dan memperpanjang prosedur pengolahan sedemikian sehingga diperlukan cara-cara alternatif untuk menyederhanakannya. Salah satu cara yang telah diperkenalkan para peneliti untuk mereduksi peran bahaya logam berat tersebut adalah dengan mengkonversi abu terbang ke bentuk material lain yang disebut geopolimer. Logam-logam berat ini akan tertahan dalam matriks geopolimer dan menjadi tidak berbahaya lagi karena sudah tidak dalam bentuk oksidanya. Fenomena ini disebut juga dengan amobilisasi (pertahanan). Amobilisasi terjadi akibat kombinasi kedua hal ini, yaitu terjadinya ikatan kimia antara logam-logam tersebut dalam matriks geopolimer dan enkapsulasi logam juga dalam matriks geopolimer.

Pada tahun 1987, produksi semen dunia menyumbang 5% dari total seluruh emisi CO₂ dunia. Pada tahun 1990, level emisi CO₂ dunia sudah tidak sesuai dengan yang ditentukan oleh institusi internasional sehubungan dengan kebutuhan semen yang sangat tinggi oleh negara-negara industri. Reduksi CO₂ sebesar 25-30% dapat diperoleh melalui pencampuran antara semen Portland dengan *coal fly-ash* dan *iron blast furnace slag*. Pada tahun 2015, dengan mengasumsikan bahwa *Global Climate* akan menetapkan jumlah produksi semen Portland campuran sebesar 1850 juta ton, kebutuhan akan material semen yang rendah emisi CO₂ sekitar 1650 juta ton, maka akan dibutuhkan material dengan teknologi yang berbeda. Maka kebutuhan teknologi baru itu dapat dijawab dengan semen geopolimer, yang dalam hal ini tidak mensyaratkan kalsinasi *limestone* (mengurangi emisi CO₂) [5].

Tabel 1.1 Estimasi kenaikan atau penurunan biaya produksi pada beberapa jenis semen

material	CO ₂ tax energy alone	CO ₂ tax energy+chemical CO ₂
Portland cement concrete	+ 20%	+ 50%
Blended Portland cement concrete 50% Portland/50% by-products	+ 20%	+ 35%
steel	+ 20%	+ 30%
wood	0%	0 to - 30%
Geopolymer cement concrete	+ 10%	+ 15%

[5]

Tabel 1.1 menyajikan data perbandingan kenaikan atau penurunan biaya produksi pada beberapa jenis semen. Jadi dengan menggunakan semen geopolimer akan diperoleh biaya produksi yang lebih rendah pula. Dengan memanfaatkan semen geopolimer, selain isu utama dalam mengurangi dampak pemanasan global akibat pelepasan emisi gas CO₂ akibat produksi semen konvensional, akan didapatkan berbagai keuntungan antara lain dapat mereduksi peran bahaya logam berat dalam limbah industri, pemanfaatan limbah sisa industri abu terbang menjadi material tepat guna, dan diperoleh material yang memiliki keunggulan sifat dalam bidang sipil, konstruksi, dan infrastruktur.

Untuk dapat menghasilkan material geopolimer yang baik dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi, diperlukan pengetahuan mengenai sifat kimia dan sifat fisika material geopolimer yang mendalam. Namun hingga saat ini belum banyak diketahui mengenai sifat kimia dan sifat fisika dari material ini.

1.2 Perumusan Masalah

Bagaimanakah perbandingan amorfisitas antara prekursor kaolin sintetis, prekursor abu terbang *class F* sintetis, prekursor kaolin alami, dan prekursor abu terbang *class F* alami dalam lingkup pengaruhnya terhadap reaktivitas geopolimer dalam medium alkali.

1.3 Tujuan Penelitian

- a) Studi pengaruh amorfisitas terhadap reaktivitas geopolimer dengan medium alkali.
- b) Membandingkan prekursor kaolin sintetis dengan kaolin alami dalam proses geopolimerisasi.
- c) Membandingkan prekursor abu terbang *class F* sintetis dengan abu terbang *class F* alami dalam proses geopolimerisasi.
- d) Membandingkan prekursor kaolin sintetis dengan prekursor abu terbang *class F* sintetis dalam proses geopolimerisasi.
- e) Membandingkan kaolin alami dengan abu terbang *class F* alami dalam proses geopolimerisasi.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

- a) Bahan baku prekursor aluminosilikat dan pengotornya merupakan *pure analyse* (Al_2O_3 , MgO, CaO)
- b) Variabel yang digunakan dalam penelitian adalah komposisi kaolin murni ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2 = 1:1$) dan komposisi abu terbang *class F* dengan pengotor CaO serta MgO ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2:\text{CaO}:\text{MgO} = 32:60:6:2$)
- c) Proses *melt-quick* model prekursor menggunakan las *oxy-acetylene*.
- d) Karakterisasi dilakukan dengan pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) dan pengujian kuat tekan.
- 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) Air yang digunakan ialah aquades

1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini ditulis dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan satu sama lain. Berikut adalah sistematika penulisan skripsi ini :

- a) Bab 1 Pendahuluan

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

b) Bab 2 Dasar Teori

Pada bab ini akan dijelaskan studi literatur tentang material geopolimer berbahan dasar kaolin dan berbahan dasar abu terbang *class F* yang berkaitan dengan penelitian ini.

c) Bab 3 Metodologi Penelitian

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai tahapan-tahapan langkah kerja yang dilakukan dalam penelitian ini. Langkah kerja tersebut mencakup preparasi prekursor, pembuatan prekursor, pembuatan pasta geopolimer, karakterisasi prekursor dan geopolimer, serta pengujian terhadap produk akhir.

d) Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini akan ditampilkan dan dijelaskan mengenai data hasil percobaan, proses pengolahan data hasil percobaan, dan analisa data hasil percobaan yang dibandingkan dengan literatur.

e) Bab 5 Kesimpulan

Pada bab ini akan ditampilkan kesimpulan dari hasil yang diperoleh penelitian ini serta analisisnya.

Referensi dan lampiran ditampilkan pada halaman-halaman terakhir dalam laporan penelitian ini.

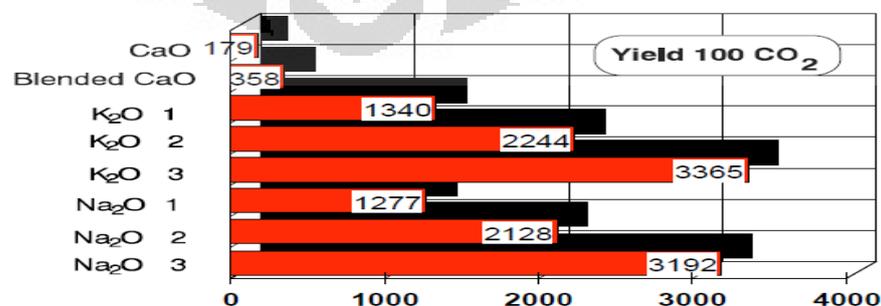
BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Material Geopolimer

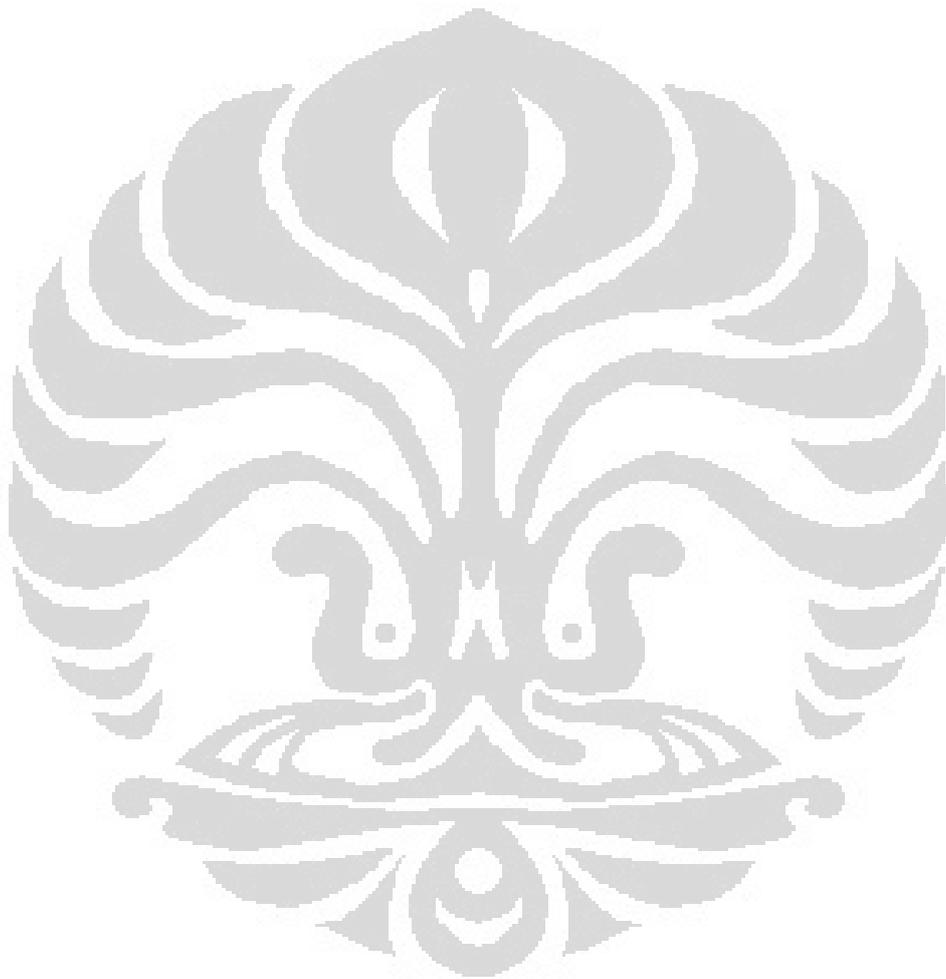
Geopolimer didefinisikan sebagai material polimer anorganik dengan struktur amorf, *3-dimensional network*. Struktur ini dihasilkan melalui proses polimerisasi yang melibatkan proses disolusi dan polikondensasi prekursor aluminosilikat. Geopolimer sendiri sering juga disebut sebagai “*mineral polymers*” dan “*polymer glasses*”.

Geopolimer diperkenalkan pertama kali oleh Joseph Davidovits pada tahun 1979, namun penelitian awal mengenai material ini telah dilakukan di Ukraina pada tahun 1950-an oleh Glukhovsky [6]. Perbedaannya adalah pada tahun 1950-an, Glukhovsky melakukan penelitian pada *alkali-activated slags* yang mengandung banyak kalsium. Sedangkan Davidovits menginisiasi penelitian penggunaan *clay* yang dikalsinasi agar terbebas dari kalsium [7]. Sejak geopolimer mulai dikenal dunia, material ini telah menarik banyak minat ilmiah para peneliti selama dua dekade belakangan. Hal ini selain karena keunggulan sifat yang dimiliki oleh material ini, disebabkan juga karena terdapat banyaknya variasi aluminosilikat padat sebagai material dasar yang dapat digunakan untuk sintesis geopolimer. Bahan dasar aluminosilikat padat ini dapat diperoleh dari mineral seperti kaolin, feldspar, bentonit, perlit, dan lain-lain. Selain dari mineral, bahan dasar aluminosilikat padat dapat juga diperoleh dari hasil sampingan industri seperti abu terbang (sisa pembakaran batubara), *alumina red mud*, *tailings* dari eksplotasi bentonit dan perlit, *slag*, dan lain-lain.



Gambar 2.1 Jumlah semen yang dapat dihasilkan dengan batas pelepasan emisi CO₂ sebesar 100 g untuk setiap oksida CaO, Na₂O, K₂O

[5]



Gambar 2.1 menunjukkan jumlah semen yang dapat dihasilkan dengan batas pelepasan emisi CO₂ sebesar 100 g untuk setiap oksida CaO, Na₂O, K₂O. Fakta yang menarik didapatkan ketika dilakukan percobaan untuk menentukan peningkatan jumlah semen yang dapat dihasilkan oleh semen Portland dan semen geopolimer, dengan batas pelepasan emisi CO₂ sebesar 100 g. Dengan asumsi proses fabrikasi melibatkan kalsinasi karbonat, seperti kalsium karbonat (*limestone*) CaCO₃ pada semen Portland, sodium karbonat (*soda*) Na₂CO₃ dan potassium karbonat (*potash*) K₂CO₃ pada semen geopolimer. Data percobaan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Geopolimer dihasilkan melalui material aluminosilikat, terdiri atas silikon dan aluminum (*polysialate*) yang mudah dan akan terlarut dalam larutan alkali aktivator. Larutan alkali ini dihasilkan melalui pencampuran sodium hidroksida dan sodium silikat. *Polysialate* adalah rantai dan cincin polimer dari Si⁴⁺ dan Al³⁺ dengan *4-fold coordination with oxygen* yang memiliki struktur mulai dari amorf hingga semi-kristalin [3]. Ion positif (Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca⁺⁺, Ba⁺⁺, NH₄⁺, H₃O⁺) harus hadir dalam kekosongan *framework* untuk menyeimbangkan muatan negatif dari Al³⁺ *4-fold coordination*. Sialat sendiri merupakan singkatan dari silikon-okso-aluminat dengan rumus sebagai berikut :

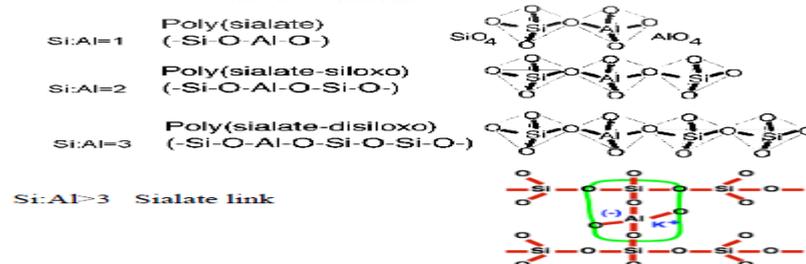


dimana : M → elemen alkali kation monovalen seperti kalium atau natrium

n → derajat polikondensasi atau polimerisasi

z → bilangan 1, 2, 3, ... 32

- → simbol ikatan



Gambar 2.2 Struktur jenis-jenis *polysialate*

[3]

Gambar 2.2 menunjukkan struktur jenis-jenis *polysialate*. Davidovitz membedakan tiga tipe *polysialate* yaitu, tipe *poly(sialate)* (-Si-O-Al-O), tipe *poly(sialate-siloxo)* (-Si-O-Al-O-Si-O), dan tipe *poly(sialate-disiloxo)* (-Si-O-Al-O-Si-O). Struktur dari ketiga jenis *polysialate* ini dapat dilihat pada Gambar 2.2.

2.2 Kaolin

Geosintesis bermanifestasi secara alami di bumi dalam kuantitas yang melimpah. Setidaknya 55% dari volume kerak bumi terdiri *siloxo-sialate* dan *sialate*, dengan silika murni atau *quartz* hanya 12% [3]. Basis dari proses geosintesis terletak pada kemampuan ion aluminium (*6-fold* atau *4-fold coordination*) menyebabkan perubahan kimia dan kristalografi pada *silica backbone*. *Kaolinite* (bukan kaolin) merupakan mineral tanah liat (*clay*), dengan komposisi kimia $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ yang merupakan mineral silikat lapisan dengan satu tetrahedral yang dihubungkan dengan alumina melalui atom oksigen. Jenis batuan yang kaya akan kaolinit dikenal sebagai *china clay*, *white clay*, atau kaolin.

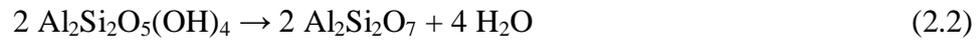


Gambar 2.3 Kaolin

[11]

Gambar 2.3 menunjukkan contoh batuan kaolin. Kaolin akan mengalami serangkaian transformasi fasa di bawah kondisi perlakuan panas pada tekanan atmosfer. Pada temperatur 550-600 °C terjadi dehidroksilasi (atau dehidrasi) yang berlangsung secara endotermik, menghasilkan *disordered metakaolin* ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$). Namun jika dipanaskan hingga mencapai temperatur 900 °C akan menyebabkan hilangnya hidroksil terus menerus dan oksolasi secara bertahap pada metakaolin [10]. Hal ini membuat metakaolin bukan sebagai campuran amorf silika (SiO_2)

dan alumina (Al_2O_3) sederhana, namun lebih merupakan struktur amorf kompleks yang dapat mempertahankan *longer-range order* (namun bukan kristalin) [10]. Berikut adalah reaksi yang terjadi pada temperatur 550-800 $^{\circ}\text{C}$:



Pemanasan hingga mencapai 925–950 $^{\circ}\text{C}$ akan mengubah metakaolin menjadi *aluminium-silicon spinel* ($\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12}$), yang disebut juga sebagai tipe struktur *gamma-alumina* :



Pemanasan di atas temperatur 1050 $^{\circ}\text{C}$ akan menyebabkan fasa spinel ($\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12}$) bernukleasi dan bertransformasi menjadi *mullite* ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), dan *cristobalite* kristalin (SiO_2):



Pada temperatur 100-200 $^{\circ}\text{C}$, *clay* akan kehilangan sebagian besar kandungan airnya. Pada suhu 550-800 $^{\circ}\text{C}$ kaolin akan kehilangan air melalui dehidroksilasi dan disebut terkalsinasi. Proses dehidroksilasi kaolin menjadi metakaolin merupakan reaksi endotermik dikarenakan besarnya jumlah energi yang dibutuhkan untuk memutuskan ion hidroksil yang berikatan secara kimia. Pada temperatur ini, kaolin menjadi metakaolin yang memiliki struktur kristal *2-dimensional order*. Dehidroksilasi yang sempurna tanpa *over heating* diperlukan agar diperoleh material *pozzolan* (material suplemen semen). Proses ini akan menciptakan struktur amorf, sementara *over heating* akan menyebabkan *sintering* yang akan menghasilkan *mullite* (nonreaktif) dan *cristalobalite* kristalin (SiO_2) [12]. Setiap material memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri. Sebagai contoh, metakaolin sebagai material dasar geopolimer memiliki kelarutan yang baik dalam larutan reaktan, menghasilkan kontrol rasio Si/Al yang baik, dan berwarna putih [13]. Namun metakaolin memiliki biaya produksi yang tinggi jika

ingin diproduksi dalam volum yang besar, karena metakaolin sendiri harus dikalsinasi pada temperatur sekitar $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama beberapa jam. Dikarenakan hal ini pula, secara ekonomi akan lebih dipilih abu terbang sebagai material dasar.

2.3 Abu Terbang

Abu terbang (*fly ash*) merupakan material sisa pembakaran industri-industri berbasis energi yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya. Industri-industri seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap, pabrik semen, pabrik kertas dan lain-lain adalah sumber penghasil abu terbang dalam jumlah yang sangat besar. Jumlah abu terbang sangat melimpah di dunia, namun masih sangat sedikit jumlahnya yang sudah dimanfaatkan. Menurut perkiraan tahun 1998, produksi abu terbang setiap tahunnya diperkirakan sekitar 390 juta ton dan yang sudah dimanfaatkan hanya sekitar 15% saja [14]. Sedangkan di *U.S.A*, produksi abu terbang setiap tahunnya diperkirakan mencapai 63 juta ton namun hanya sekitar 20% saja yang sudah dimanfaatkan untuk industri semen [15]. Oleh karena itu, pemanfaatan material ini dalam industri semen perlu ditingkatkan agar dapat dihasilkan teknologi semen yang lebih ramah lingkungan. Sebagai perbandingan, setiap 1 juta ton abu terbang yang menggantikan *Ordinary Portland Cement* (OCP), membantu mengurangi pemakaian 1 juta ton *limestone* dan 0,25 juta ton batu bara [16].

Abu terbang memiliki ukuran partikel yang sangat kecil ($0.5 - 100\text{ }\mu\text{m}$) sehingga mudah beterbangan oleh udara. Abu terbang batubara terdiri dari butiran halus yang umumnya berbentuk bola padat atau berongga. Kerapatan abu terbang berkisar antara 2100 sampai 3000 kg/m^3 dan luas area spesifiknya (diukur berdasarkan metode permeabilitas udara *Blaine*) antara 170 sampai $1000\text{ m}^2/\text{kg}$ [17]. Secara kimia, abu terbang batubara merupakan mineral aluminosilikat yang banyak mengandung unsur-unsur Ca, K, dan Na di samping juga mengandung sejumlah kecil unsur C dan N. Limbah padat abu terbang paling banyak dihasilkan dari sektor pembangkit listrik. Komponen utama dari abu terbang batubara yang berasal dari pembangkit listrik adalah silika (SiO_2), alumina, (Al_2O_3), dan besi

oksida (Fe_2O_3), sisanya adalah karbon, kalsium, magnesium, dan belerang. Rumus empiris abu terbang adalah sebagai berikut :



Berdasarkan ASTM C 618 terdapat tiga jenis abu terbang yaitu tipe N, F, C. Klasifikasi jenis abu terbang tersebut didasarkan pada kandungan kalsium, silika, alumina, dan besi yang terkandung dalam abu terbang. Sifat kimia yang dihasilkan oleh abu terbang dipengaruhi oleh komposisi kandungan kimia yang menyusun batu bara yang dibakar misalnya antrasit, lignit, atau *bituminous* [18].

Tabel 2.1 Komposisi kimia abu terbang berdasarkan jenis batu bara asal

Komponen	<i>Bituminous</i>	<i>Subbituminous</i>	Lignit
SiO_2	20 – 60 %	40 – 60 %	15 – 45 %
Al_2O_3	5 – 35 %	20 – 30 %	10 – 25 %
Fe_2O_3	10 - 40%	4 – 10 %	4 – 15 %
CaO	1 – 12%	5 – 30 %	15 - 40 %
MgO	0 – 5 %	1 – 6 %	3 – 10 %
SO_3	0 – 4 %	0 – 2 %	0 – 10 %
Na_2O	0 – 4 %	0 – 2 %	0 – 6 %
K_2O	0 – 3 %	0 – 4 %	0 – 4 %
LOI	0 – 15 %	0 – 3 %	0 – 5 %

[19]

Tabel 2.1 menampilkan komposisi kimia abu terbang berdasarkan jenis batu bara asal. Namun hanya dua jenis abu terbang yang dihasilkan dari hasil pembakaran batu bara yaitu abu terbang tipe C yang dihasilkan dari pembakaran lignit atau *subbituminous* dan tipe F yang dihasilkan dari pembakaran antrasit atau batu bara *bituminous*.

Sifat geopolimer yang dihasilkan juga sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel, kandungan kalsium, kandungan logam alkali, kandungan amorf, morfologi dan jenis abu terbang yang digunakan [20]. Abu terbang tipe F biasanya memiliki kandungan kapur (CaO) kurang dari 10 % sedangkan tipe C mengandung lebih dari 20 % CaO.

Tabel 2.2 Sifat kimia dan fisika abu terbang berdasarkan ASTM C 618

ASTM Specification C618-92a Chemical and Physical Specifications			
	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Chemical Requirements			
Silicon dioxide, aluminum oxide, Iron oxide (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃) min. %	70	70	50
Sulfur trioxide (SO ₃), max. %	4.0	5.0	5.0
Moisture content, max. %	3.0	3.0	3.0
Loss on ignition, max. %	10.0	6.0 ^a	6.0
Available alkalis as Na ₂ O, max % ^b	1.5	1.5	1.5
Physical Requirements			
Fineness, max. % retained on 325-mesh sieve	34	34	34
Strength Activity Index Portland Cement			
7-day, min. % control	75 ^c	75 ^c	75 ^c
28-day, min % of control	75 ^c	75 ^c	75 ^c
Water requirement, max. % of control	115	105	105
Autoclave expansion, soundness, max. %	0.8	0.8	0.8
A. The use of Class-F pozzolan with up to 12% loss on ignition may be approved by the user if either acceptable performance records or laboratory test results and made available.			
B. Applicable only when specifically required by the purchaser for mineral admixture to be used in concrete containing reactive aggregate and cement to meet a limitation of the alkali content.			
C. Meeting the 7 or 28 day strength activity index will indicate specification compliance.			

[21]

Tabel 2.2 menampilkan perbedaan sifat kimia dan fisika abu terbang berdasarkan spesifikasi ASTM C 618. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Fernandez-Jimenez dan Palomo pada 2003 [22], diketahui juga bahwa kandungan kalsium dalam abu terbang mempengaruhi kenaikan kekuatan dan nilai akhir kuat tekan. Semakin tinggi kandungan kalsium, maka semakin cepat kenaikan kekuatan dan semakin besar nilai kuat tekan. Namun, untuk menghasilkan

material semen yang memiliki kemampuan mengikat yang baik, abu terbang yang digunakan harus memiliki kandungan kalsium yang kecil dan karakteristik lainnya seperti material yang tak terbakar sebesar dibawah 5%, kandungan Fe_2O_3 tidak lebih tinggi dari 10%, kandungan silika sebesar 40-50%, partikel dengan ukuran sebesar lebih rendah dari 45 μm dan kandungan fasa *vitreous* yang tinggi [22]. Selain itu juga, kehadiran kalsium dalam abu terbang dalam jumlah yang signifikan dapat mempengaruhi *setting rate* polimerisasi dan mikrostruktur [13]. Maka, sejauh ini penggunaan abu terbang jenis *low calcium* (*ASTM class F*) lebih baik sebagai material dasar geopolimer dibandingkan dengan abu terbang jenis *high calcium* (*ASTM class C*).

2.4 Larutan Alkali Aktivator dan Reaksi Polimerisasi

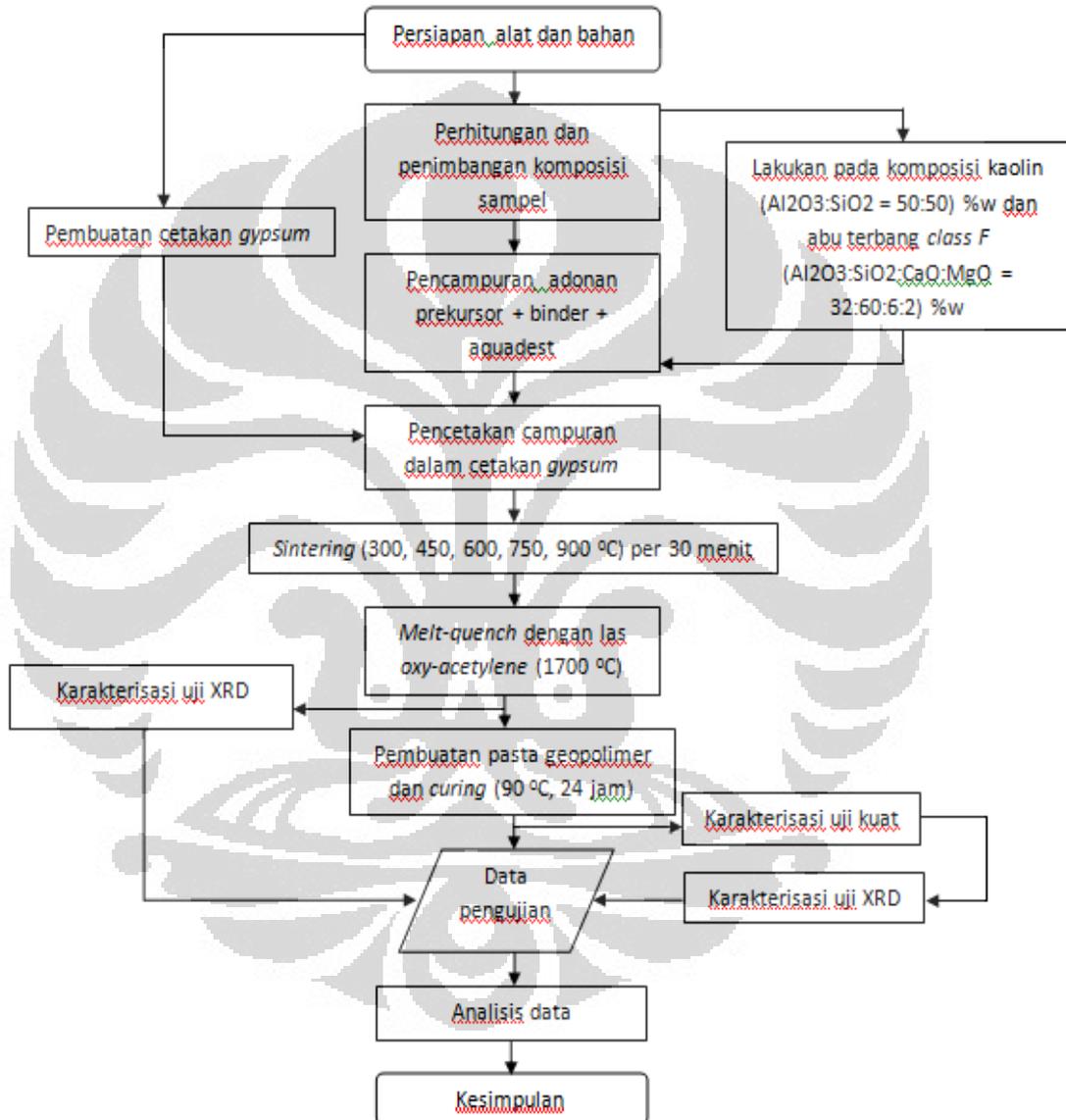
Geopolimer dihasilkan melalui material aluminosilikat, terdiri atas silikon dan aluminum yang mudah dan akan terlarut dalam larutan alkali aktivator. Alkali aktivator sendiri merupakan elemen penting yang harus diperhatikan dalam pembuatan pasta geopolimer. Rasio komposisi antara prekursor geopolimer dengan larutan alkali aktivator berperan dalam menentukan kuat tekan pasta geopolimer dalam temperatur tinggi [23].

Berdasarkan penelitian yang dilakukan A. Palomo [24], larutan alkali aktivator yang dapat menghasilkan kuat tekan yang optimum adalah larutan alkali aktivator campuran antara natrium hidroksida dengan natrium silikat atau campuran antara kalium hidroksida dengan kalium silikat. Penggunaan larutan natrium hidroksida (NaOH) dan larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) dapat menghasilkan kekuatan tekan yang tinggi. Pada saat proses polimerisasi berlangsung, terjadi reaksi endotermis. Panas yang diserap berasal dari temperatur *curing*, dimana semakin tinggi temperatur *curing* maka proses aktivasi prekursor akan meningkat. Selain temperatur *curing*, waktu *curing* juga berpengaruh. Kuat tekan dapat mencapai hingga 60 MPa jika di-curing pada suhu 85° C selama 5 jam [24]. Natrium silikat akan larut dalam air dan selanjutnya akan menghasilkan kation Na^+ yang berperan sebagai penyeimbang muatan (*charge balancer*) dalam struktur *cross-link* aluminosilikat [25]. Penambahan natrium hidroksida bertujuan untuk menambah kation Na^+ saat proses polimerisasi, serta berperan dalam

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir penelitian.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Peralatan

a) Cetakan *gypsum*



Gambar 3.2 Cetakan *gypsum*

Gambar 3.2 menunjukkan cetakan *gypsum*. Cetakan *gypsum* terbuat dari kardus yang dilapisi lakban pada permukaannya. Cetakan ini akan berperan sebagai *casting slip*. Cetakan berbentuk tabung *hollow* dengan panjang 9 cm dan diameter 4 cm. Desain yang digunakan pada cetakan *gypsum* adalah cetakan dengan pola belah agar memudahkan proses pelepasan *gypsum* dari cetakan.

b) Timbangan *digital*



Gambar 3.3 Timbangan digital

Gambar 3.3 menunjukkan timbangan digital. Timbangan digunakan untuk menimbang komposisi penyusun prekursor dan pasta geopolimer. Timbangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah timbangan *digital* yang terdapat pada

Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Jenis timbangan ini dipilih karena memiliki keakuratan nilai yang tinggi dalam menentukan berat.

c) *Oven*



Gambar 3.4 Oven nabertherm

Gambar 3.4 menunjukkan oven nabertherm. Oven dalam penelitian ini digunakan untuk proses *sintering rod precursor* dan proses *curing* pasta geopolimer. Oven yang digunakan dalam penelitian ini adalah oven nabertherm yang berada di Laboratorium Metalografi dan HST Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Oven ini digunakan karena memiliki kestabilan temperatur yang baik atau perubahan temperatur yang rendah untuk menjaga temperatur *curing* konstan.

d) *Blender*



Gambar 3.5 *Blender*

Gambar 3.5 menunjukkan *blender*. *Blender* dalam penelitian ini digunakan untuk mencampur adonan prekursor.

e) Las *oxy-acetylene*Gambar 3.6 Las *oxy-acetylene*

Gambar 3.6 menunjukkan las *oxy-acetylene*. Las digunakan untuk melelehkan prekursor geopolimer pada proses *melt-quench* yang sudah di *sintering*. Las yang digunakan adalah jenis las *oxy-acetylene* atau yang dikenal umum sebagai las karbit. Temperatur operasi las pada penelitian ini sekitar 1700 °C. Las *oxy-acetylene* yang digunakan berasal dari *workshop* Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.

f) Wadah besi



Gambar 3.7 Wadah besi

Gambar 3.7 menunjukkan wadah besi. Wadah besi digunakan sebagai wadah untuk tempat terjadinya proses quenching lelehan prekursor geopolimer.

g) *Planetary ball mill*



Gambar 3.8 *Planetary ball mill*

Gambar 3.8 menunjukkan *planetary ball mill*. *Planetary ball mill* digunakan untuk menghancurkan *droplets* hasil *melt-quench* ke dalam ukuran partikel yang lebih kecil atau bentuk serbuk. *Planetary ball mill* yang digunakan berasal dari CMPFA.

h) Selang air



Gambar 3.9 Selang air

Gambar 3.9 menunjukkan selang air. Digunakan sebagai cetakan pasta geopolimer. Selang memiliki diameter 1,5 cm dan panjang 3 cm. Perbandingan antara diameter dengan panjang selang harus sesuai dengan dimensi uji kuat tekan yaitu 1:2.

i) XRD



Gambar 3.10 Mesin XRD-7000 Diffractometer (Shimadzu)

Gambar 3.10 menunjukkan mesin XRD-7000 Diffractometer (Shimadzu). XRD digunakan untuk mengetahui tingkat kristalinitas dan identifikasi fasa secara kualitatif dari sampel. Pada penelitian ini, pengujian ini berguna untuk mengetahui apakah prekursor dan geopolimer yang kristalin atau amorf. Pengujian ini menggunakan mesin XRD-7000 Diffractometer (Shimadzu) dengan radiasi sinar Cu yang terdapat di Laboratorium Teknik Terpadu Universitas Islam Negeri.

j) Mesin uji kuat tekan



Gambar 3.11 Mesin uji kuat tekan

Gambar 3.11 menunjukkan mesin uji kuat tekan. Mesin ini digunakan untuk mengetahui kuat tekan dari sampel geopolimer. Mesin yang digunakan

adalah mesin uji kuat tekan yang ada di Lab *Destructive Test* Departemen Metalurgi dan Material FTUI dengan merek TARNO.

k) Mortar dan alu



Gambar 3.12 Mortar dan alu

Gambar 3.12 menunjukkan mortar dan alu. Mortar dan alu digunakan untuk menghancurkan geopolimer menjadi serbuk setelah uji kuat tekan sebagai sampel uji XRD.

3.2.2 Bahan Baku

a) *Alumina powder* (ALCOA) 99,7%



Gambar 3.13 *Alumina powder* (ALCOA) 99,7%

Gambar 3.13 menunjukkan *Alumina powder* (ALCOA) 99,7%. Material ini digunakan sebagai bahan dasar penyusun prekursor. *Alumina powder* (ALCOA) 99,7% yang digunakan berbentuk serbuk dan merupakan jenis *pure analyse*.

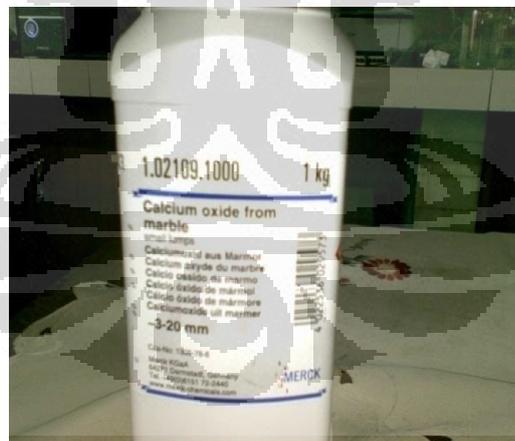
b) *Silika Flour* 99,5%



Gambar 3.14 *Silika Flour* 99,5%

Gambar 3.14 menunjukkan *Silika Flour* 99,5%. Material ini digunakan sebagai bahan dasar penyusun prekursor. *Silika Flour* 99,5% yang digunakan berbentuk serbuk.

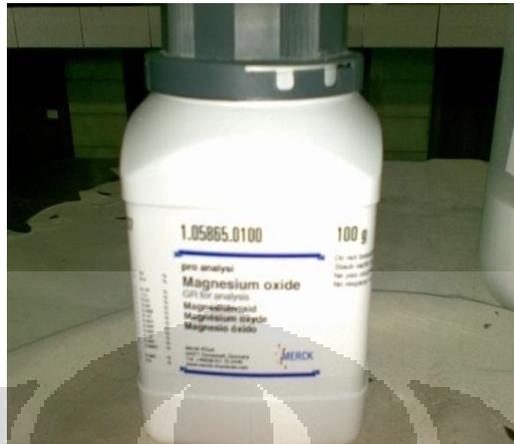
c) CaO 99,5%



Gambar 3.15 CaO 99,5%

Gambar 3.15 menunjukkan CaO 99,5%. Material ini digunakan sebagai bahan dasar penyusun prekursor dengan komposisi abu terbang *class F*. CaO 99,5% yang digunakan merupakan jenis *pure analyse*.

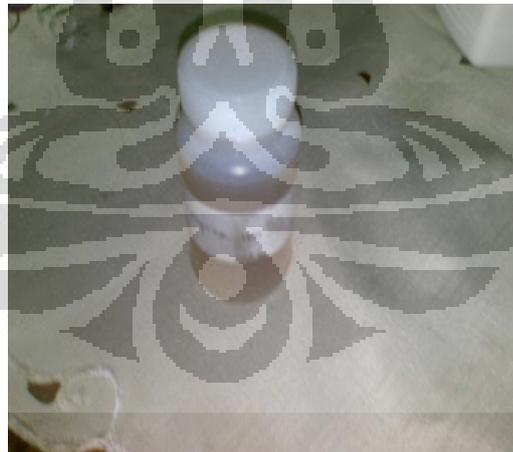
d) MgO 99,5%



Gambar 3.16 MgO 99,5%

Gambar 3.16 menunjukkan MgO 99,5%. Material ini digunakan sebagai bahan dasar penyusun prekursor dengan komposisi abu terbang *class F*. MgO 99,5% yang digunakan berbentuk serbuk dan merupakan jenis *pure analyse*.

e) Dispex



Gambar 3.17 Dispex

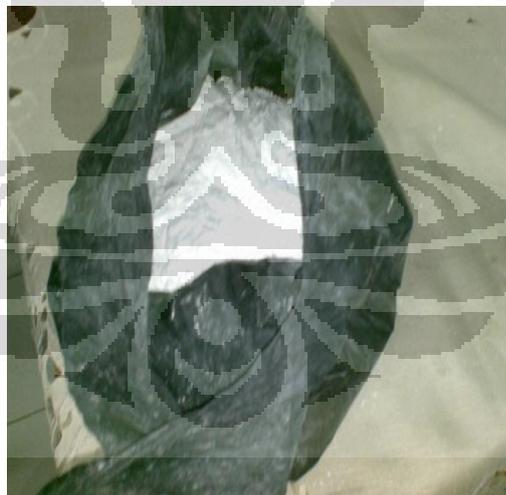
Gambar 3.17 menunjukkan dispex. Dispex berbentuk larutan, digunakan sebagai *binder* dan *dispersant* pada campuran adonan prekursor geopolimer.

f) Aquadest



Gambar 3.18 Aquadest

Gambar 3.18 menunjukkan aquadest. Aquadest yang digunakan diperoleh dari Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.

g) Paris plester / *gypsum*Gambar 3.19 Paris plester / *gypsum*

Gambar 3.19 menunjukkan paris plester / *gypsum*. Bahan berbentuk serbuk yang diperoleh dan mudah didapatkan dari pasaran ini digunakan untuk membuat *casting slip* pada proses pembuatan prekursor geopolimer (*slip casting*).

h) *Talc*Gambar 3.20 *Talc*

Gambar 3.20 menunjukkan *talc*. *Talc* berbentuk serbuk digunakan saat proses *slip casting* untuk memudahkan pelepasan prekursor dari *casting slip*.

i) Natrium silikat (Na_2SiO_3)Gambar 3.21 Natrium silikat (Na_2SiO_3)

Gambar 3.21 menunjukkan natrium silikat (Na_2SiO_3). Natrium silikat (Na_2SiO_3) berbentuk larutan yang akan digunakan sebagai penyusun alkali aktivator pada proses geopolimerisasi. Natrium silikat (Na_2SiO_3) merupakan jenis *pure analyse* dengan spesifikasi sebagai berikut :

Acidimetric, $\text{Na}_2\text{O} = 7,5 - 8,5 \%$

Acidimetric, $\text{SiO}_2 = 25,5 - 28,5 \%$

Density (20°C) = $1,296 - 1,390 \text{ gram/ml}$

j) Natrium hidroksida (NaOH)



Gambar 3.22 Natrium hidroksida (NaOH)

Gambar 3.22 menunjukkan natrium hidroksida (NaOH). Natrium hidroksida (NaOH) berbentuk pelet yang akan digunakan sebagai penyusun alkali aktivator pada proses geopolimerisasi. Natrium hidroksida (NaOH) merupakan jenis *pure analyse* dengan spesifikasi sebagai berikut :

M = 40 gram/mol

Acidimetric, NaOH > 99 %

Carbonate (Na₂CO₃) < 1 %

3.3 Komposisi

Komposisi yang digunakan dalam penelitian ini adalah komposisi untuk pembuatan prekursor geopolimer dan komposisi untuk pembuatan pasta geopolimer.

3.3.1 Komposisi Prekursor Geopolimer

Komposisi prekursor geopolimer ditentukan berdasarkan komposisi rasio Si/Al asli dari kaolin %w (Al₂O₃ : SiO₂) = (50 : 50) dan abu terbang *class F* %w (Al₂O₃ : SiO₂ : CaO : MgO) = (32 : 60 : 6 : 2).

3.3.1.1 Kaolin

- a) Al₂O₃ 99,7% (ALCOA) (49,85 gr).
- b) SiO₂ 99,5% (49,75 gr).

- c) Aquadest (50 gr).
- d) Dispex (10 gr).

3.3.1.2 Abu Terbang Class F

- a) Al_2O_3 99,7% (ALCOA) (31,90 gr).
- b) SiO_2 99,5% (59,70 gr).
- c) CaO 99,5% (5,97 gr).
- d) MgO 99,5% (1,99 gr).
- e) Aquadest (50 gr).
- f) Dispex (10 gr).

3.3.2 Komposisi Pasta Geopolimer

Komposisi antara prekursor dengan larutan alkali aktivator ditentukan berdasarkan komposisi pasta geopolimer yang sudah didapatkan sebelumnya dari literatur sehingga dapat digunakan sebagai data perbandingan kristalinitas dan kuat tekan. Komposisi yang digunakan adalah komposisi ideal sehingga dapat menghasilkan reaktivitas yang optimum.

3.3.2.1 Geopolimer Dari Prekursor Metakaolin Sintetis

- a) Metakaolin (3,61 gr).
- b) NaOH (1,17 gr).
- c) Na_2SiO_3 (4,59 gr).
- d) H_2O (0,63 gr).

3.3.2.2 Geopolimer Dari Prekursor Abu Terbang Class F Sintetis

- a) Ash (5 gr).
- b) NaOH (1 gr).
- c) Na_2SiO_3 (4 gr).

3.4 Pembuatan Campuran Prekursor, Slip Casting, dan Sintering

Campuran prekursor dibuat dengan mencampurkan sejumlah komposisi yang telah disebutkan pada subbab 3.3 ke dalam *blender*. Untuk mendapatkan

jumlah berat yang sesuai dengan komposisi yang ada, maka digunakan timbangan *digital*. Setelah proses penimbangan selesai, selanjutnya bahan dasar dimasukkan dan dicampur di dalam *blender* selama 20 menit untuk masing-masing jenis campuran agar menghasilkan campuran yang homogen dan terdispersi secara sempurna.

Sebelumnya, pembuatan cetakan *gypsum* dilakukan dengan menggunakan kardus membentuk tabung *hollow* yang memiliki panjang 9 cm dan diameter 4 cm. Desain yang dipilih untuk cetakan *gypsum* adalah pola belah dan kemudian dilapisi dengan lakban pada permukaannya agar memudahkan pelepasan antara *gypsum* yang sudah mengering dan cetakan. Selanjutnya untuk membuat *slip casting casting slip*, *gypsum* serbuk dicampur dengan air dan dimasukkan ke dalam cetakan, lalu dibiarkan selama beberapa saat hingga mengering dan mengeras. Selanjutnya cetakan dilepaskan dari *gypsum* dan *casting slip* telah siap pakai.

Slip casting dilakukan dengan menuangkan campuran prekursor ke dalam *casting slip*. Sebelum proses penuangan, permukaan *casting slip* yang akan mengalami kontak langsung dengan campuran prekursor dilapisi dengan *talca*. Hal ini dilakukan agar proses pelepasan prekursor yang sudah mengering dari *casting slip* menjadi lebih mudah. Lakukan proses penuangan campuran prekursor ke dalam *casting slip*, lalu biarkan agar air yang terdapat pada campuran prekursor terserap oleh pori-pori *gypsum casting slip* sehingga mengeras. Setelah mengeras, pisahkan prekursor dari *casting slip*.

Selanjutnya, prekursor yang telah dilepaskan dari *casting slip* dimasukkan ke dalam oven *nabertherm* untuk *sintering*. *Sintering* dilakukan dengan tujuan untuk memadatkan *density* prekursor. *Sintering* dilakukan dengan bertahap pada temperatur 300 °C, 450 °C, 600 °C, 750 °C, dan 900 °C dengan masing-masing temperatur selama 30 menit. Hal ini dilakukan untuk menghindari terjadinya *thermal shock*. Produk akhir menghasilkan prekursor berbentuk tabung dengan panjang 9 cm dan diameter 2 cm.

3.5 Proses Melt-Quench

Setelah prekursor di *sintering*, maka selanjutnya prekursor akan di *melt-quench* dengan menggunakan las *oxy-acetylene* dan aquades. Pertama, disiapkan

wadah besi yang telah diisi oleh aquades sebagai wadah untuk proses *quenching* lelehan prekursor. Setelah itu, prekursor dilelehkan dengan menggunakan las *oxy-acetylene* pada suhu 1700 °C. Prekursor meleleh setetes demi setetes, lalu tetesan lelehan tersebut masuk ke dalam wadah besi berisi aquades dan mengalami proses *quenching* lalu mengeras menjadi solid.

3.6 Pembuatan Geopolimer

Droplets yang telah dihasilkan melalui proses *melt-quench* selanjutnya harus dirubah bentuknya menjadi serbuk, agar memiliki ukuran partikel yang lebih kecil. Untuk proses ini digunakan mesin *planetary ball mill*, yang terdapat di Departemen Metalurgi dan Material. Mesin ini memiliki kecepatan putaran maksimum 540 rpm dan wadah serta bola penghancur yang terbuat dari alumina sehingga memiliki kekerasan yang lebih tinggi. Pada penelitian ini digunakan kecepatan putaran maksimum yaitu 540 rpm dan wadah serta bola penghancur dari alumina. *Milling* dilakukan untuk masing-masing jenis sampel selama 60 menit.

Untuk setiap serbuk prekursor yang didapatkan dari *droplets* komposisi kaolin dan abu terbang *class F*, akan direaksikan dengan larutan alkali aktivator. Komposisi pasta geopolimer yang dibuat mengikuti komposisi seperti yang sudah tertulis pada subbab 3.3. Larutan alkali aktivator dibuat dengan mereaksikan NaOH dengan Na₂SiO₃. Setelah terdapat larutan alkali aktivator yang homogen, ditandai dengan penurunan temperatur larutan ke temperatur ruang, maka prekursor direaksikan dengan larutan alkali aktivator. Setelah prekursor direaksikan dengan alkali aktivator, akan tercipta pasta yang memiliki kekentalan secara visual seperti susu kental, maka campuran tersebut dimasukkan ke dalam cetakan dari selang yang memiliki diameter 1,5 cm dan panjang 3 cm. Sebelumnya, bagian bawah selang ditutup dengan selotip dan setelah campuran dituang ke dalam cetakan, selanjutnya bagian atas cetakan ditutup dengan selotip agar menghindari penguapan yang berlebihan. Setelah itu cetakan yang telah berisi pasta geopolimer dimasukkan ke dalam oven nabertherm dengan waktu *curing* dan temperatur *curing* masing-masing sebesar 24 jam dan 90 °C.

3.7 Karakterisasi

Karakterisasi sampel dilakukan dengan pengujian XRD dan pengujian kuat tekan.

3.7.1 XRD

Pada penelitian ini, pengujian XRD melalui teknik *Wide Angle X-ray Scattering* (WAXS) digunakan untuk mengetahui tingkat kristalinitas dan identifikasi fasa secara kualitatif dari sampel. Sampel berupa serbuk yaitu abu terbang diletakkan pada tempat pengujiannya yang kemudian siap diuji pada mesin XRD. Selanjutnya didapatkan grafik dengan axis berupa 2θ dan ordinat berupa intensitas melalui perangkat lunak. Suatu senyawa memiliki 2θ dan intensitas spesifik sehingga untuk mengetahui senyawa apakah yang berada pada puncak suatu grafik XRD dapat dilakukan dengan mencocokkan data grafik tersebut dengan database yang dirangkum oleh *International Centre for Diffraction Data*.

Sampel untuk masing-masing komposisi yang akan diujikan dengan XRD adalah sampel prekursor setelah mengalami proses *milling* dan sampel geopolimer setelah mengalami uji kuat tekan dan proses *milling*. Selain itu juga bahan dasar berupa Al_2O_3 99,7% (ALCOA), SiO_2 99,5%, CaO 99,5% , dan MgO 99,5% juga diuji XRD sebagai data pembanding tambahan.

3.7.2 Uji Kuat Tekan

Sampel yang akan diuji kuat tekan adalah sampel-sampel geopolimer yang telah mengalami proses *curing*.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nominal kuat tekan geopolimer sehingga dapat diperoleh nilai nominal perbandingan kuat tekan. 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. Kuat tekan dipengaruhi oleh luas permukaan yang dikenai oleh beban. Nilai kuat tekan (σ)

didapatkan dengan memasukkan nilai beban yang terbaca dan luas permukaan kontak sampel ke dalam persamaan berikut :

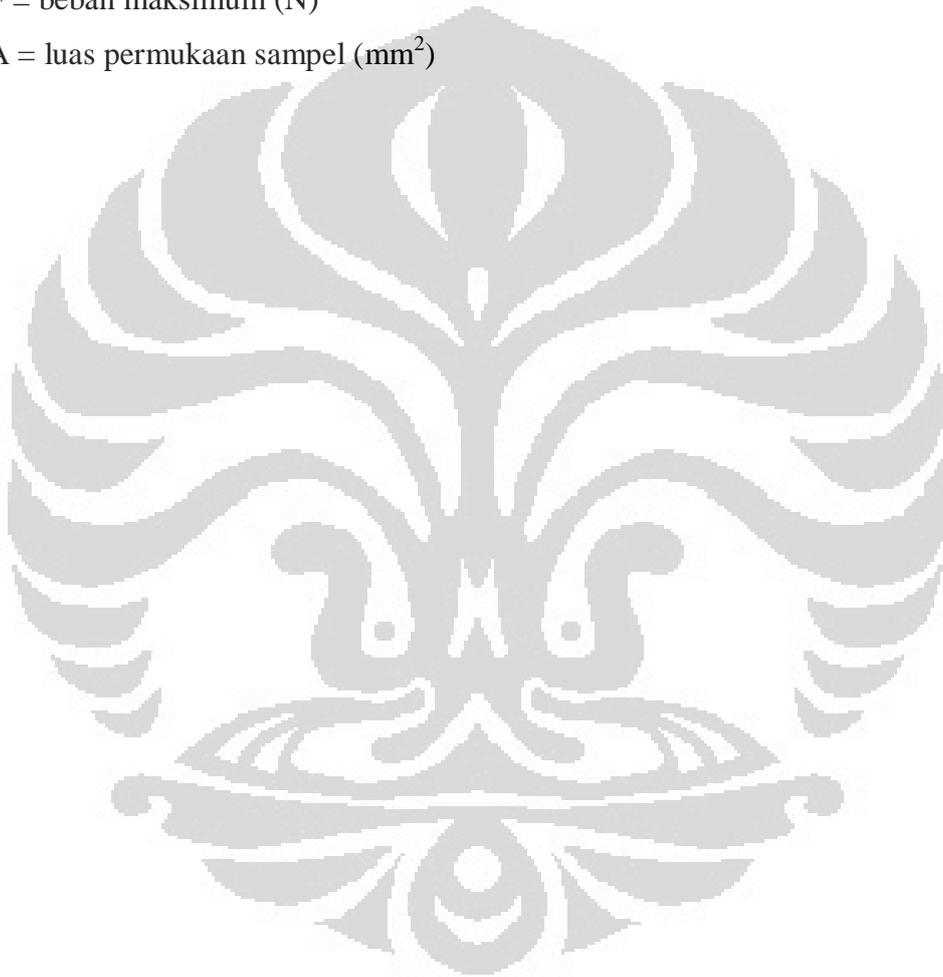
$$\sigma = F/A \quad (3.1)$$

dengan :

σ = kuat tekan (Mpa)

F = beban maksimum (N)

A = luas permukaan sampel (mm²)



BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembuatan Campuran Prekursor, *Slip Casting*, dan *Sintering*

Campuran prekursor dibuat dengan mencampurkan sejumlah komposisi yang telah disebutkan pada subbab 3.3 ke dalam *blender*. Proses *mixing* ini diharapkan dapat menghasilkan campuran prekursor yang homogen dan terdispersi secara sempurna.

Saat proses *mixing* selesai, pada campuran prekursor dengan komposisi kaolin dan campuran prekursor dengan komposisi abu terbang *class F* ditemui sejumlah agregat pada bagian dasar. Hal ini mungkin dikarenakan terjadinya *flocculation* pada campuran prekursor. *Flocculation* sendiri merupakan peristiwa terbentuknya agregat atau *floc* yang disebabkan karena partikel tidak terdispersi dan selanjutnya beraglomerasi (dipengaruhi gaya Van der Waals) membentuk partikel yang lebih besar (*floc*). *Flocculant* (*flocking agent*) sendiri merupakan kation multivalen seperti aluminium, besi, kalsium, dan magnesium [27]. Hal ini dapat diatasi dengan penambahan *deflocculant* yang sesuai dan presisi. Dalam penelitian ini, hal tersebut mengindikasikan *deflocculant* yang ditambahkan jumlahnya tidak sesuai dengan komposisi campuran. *Deflocculant* yang digunakan pada penelitian ini adalah Dispex, yang berfungsi sebagai *dispersant*. *Deflocculant* sendiri merupakan elektrolit yang menyebabkan partikel alumina dan silika terdispersi dan menjadi *electrically charge* sehingga tidak menyebabkan agregat. Jumlah *deflocculant* yang ditambahkan ke dalam campuran harus sesuai selain agar tidak menyebabkan terjadinya *flocculation*, juga untuk menghindari terjadinya *deffloculation* yang berlebihan.

Selanjutnya, setelah proses *mixing* selesai dilakukan proses *slip casting*. *Slip casting* dilakukan dengan menuangkan campuran prekursor ke dalam *casting slip*. Lalu dibiarkan agar air yang terdapat pada campuran prekursor terserap oleh pori-pori *gypsum casting slip* sehingga mengeras. Setelah mengeras, prekursor dipisahkan dari *casting slip*.



Gambar 4.1 Prekursor hasil *slip casting*.

Gambar 4.1 menunjukkan prekursor hasil *slip casting*. Saat prekursor dilepas dari *casting slip*, ditemukan beberapa cacat pada sampel. Yang pertama adalah terdapatnya lubang kecil pada permukaan (*pinholing*). Hal ini kemungkinan karena disebabkan oleh adanya udara yang terperangkap saat proses *pouring*.

Yang kedua adalah terdapatnya rambatan patahan (*crack*) pada beberapa sampel (tepatnya sepanjang bagian sampel yang berada pada sambungan pola belah *casting slip*).



Gambar 4.2 *Casting slip*

Gambar 4.2 menunjukkan *casting slip*. Rambatan patahan pada sampel ini diperkirakan karena tingkat *moisture* yang berbeda pada *cup* dan *drag* dari *casting slip*.

Yang ketiga adalah sulitnya melepas sampel dari beberapa *casting slip*. Hal ini mungkin disebabkan oleh kurangnya pemberian jumlah *talc* yang merata

pada beberapa *casting slip* sebelum proses *pouring*. *Talc* dalam hal ini berperan sebagai *body flux*. Jumlah air yang ditambahkan dirasa tidak berlebihan dengan parameter tidak terjadinya *slow casting* (waktu pengecoran tak terlalu lama).

Sintering dilakukan dengan bertahap pada temperatur 300 °C, 450 °C, 600 °C, 750 °C, dan 900 °C dengan masing-masing temperatur selama 30 menit. Pemanasan bertahap ini dilakukan untuk menghindari *thermal shock* pada sampel.

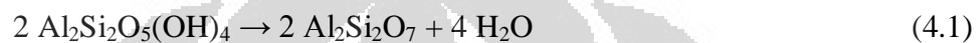


Gambar 4.3 Prekursor setelah di *sintering*

Gambar 4.3 menunjukkan prekursor setelah di *sintering*. Pada sampel hasil *sintering* ditemukan penampakan permukaan yang kering namun *brittle*. Melalui patahan sampel, ditemukan bahwa pada bagian dalam (*interior*) sampel ini ternyata lebih *brittle* dari bagian luarnya (*exterior*). Kemungkinan hal ini disebabkan karena terlalu tingginya temperatur *drying* sebagai temperatur awal *sintering*. Hal ini menyebabkan terjadinya *water removal rate* yang tak terkontrol. Hal ini terjadi ketika jumlah air yang terevaporasi pada permukaan (*evaporation rate*) jauh lebih tinggi dibandingkan dengan jumlah air yang berdifusi dari *interior* menuju permukaan (*diffusion rate*). Temperatur *drying* yang baik adalah sekitar di bawah 50 °C [28].

Pada sampel dengan komposisi kaolin, saat pemanasan pada temperatur awal (300 °C), sampel akan kehilangan sebagian besar kandungan airnya [12]. Pada saat inilah terjadi proses densifikasi. Setelah itu pada temperatur 550-800 °C, sampel akan kehilangan seluruh kandungan airnya sehingga terbentuk *disordered metakaolin*. Proses dehidroksilasi kaolin menjadi metakaolin merupakan reaksi

endotermik dikarenakan besarnya jumlah energi yang dibutuhkan untuk memutuskan ion hidroksil yang berikatan secara kimia. Pada temperatur ini, kaolin menjadi metakaolin yang memiliki struktur kristal *2-dimensional order*. Dehidroksilasi yang sempurna tanpa *over heating* diperlukan agar diperoleh material *pozzolan* (material suplemen semen). Proses ini akan menciptakan struktur amorf, sementara *over heating* akan menyebabkan *sintering* yang akan menghasilkan *mullite* (nonreaktif) dan *cristalobalite* kristalin (SiO_2) [12]. Berikut adalah reaksi yang terjadi pada temperatur 550-800 °C :

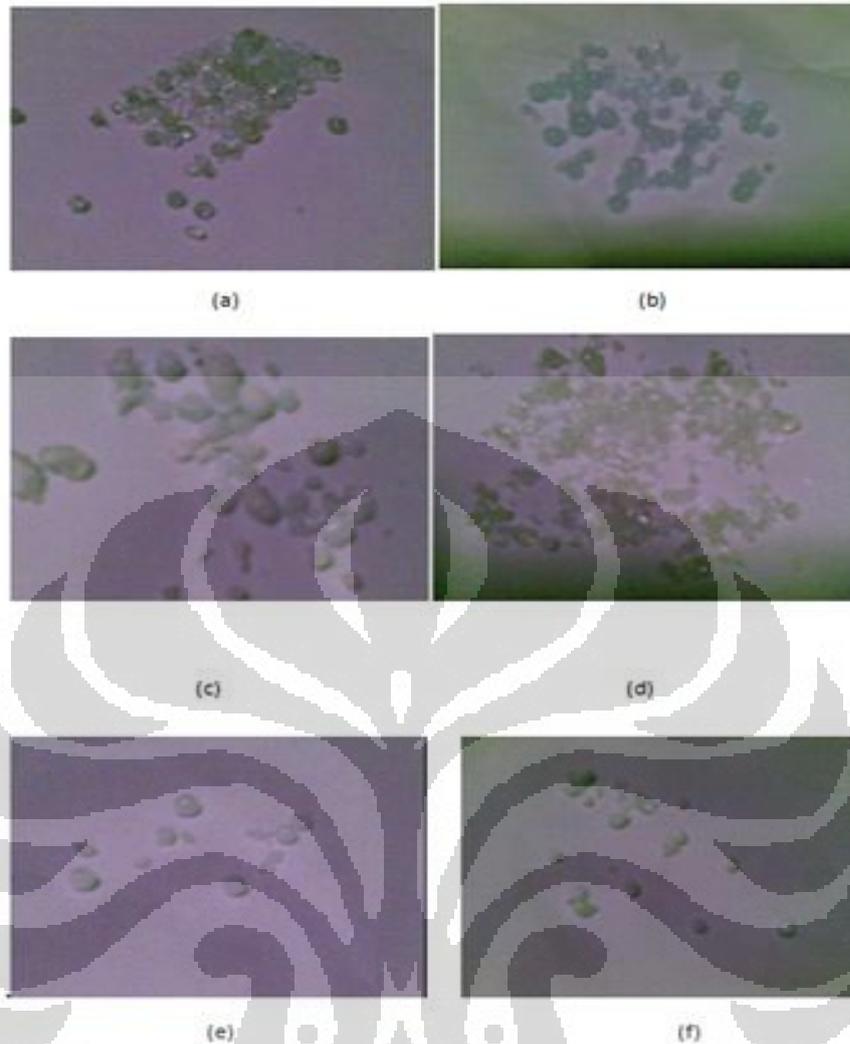


Sementara itu, jika *sintering* pada sampel dengan komposisi abu terbang *class F* dilakukan pada temperatur yang lebih tinggi lagi akan membentuk fasa campuran *gehlenite* ($2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) dan *akermanite* ($2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$), sebagai *depolymerized calcium silicate glass* yang bersifat sangat reaktif dalam medium alkali. Fasa campuran ini terbentuk karena adanya pengotor CaO dan MgO pada prekursor abu terbang *class F* sintetis. *Gehlenite* dan *akermanite* ini dapat berbentuk gelas atau kristalin tergantung pada laju pendinginannya [29].

4.2 Proses *Melt-Quench*

Proses *melt-quench* dilakukan dengan menggunakan las *oxy-acetylene* sebagai sumber panas untuk melelehkan prekursor dan aquades sebagai medium *quenching*. Temperatur yang digunakan pada las *oxy-acetylene* ~ 1700 °C. Prekursor akan dipanaskan dengan las *oxy-acetylene* pada ~ 1700 °C lalu meleleh setetes demi setetes. Tetesan lelehan tersebut masuk ke dalam wadah besi berisi aquades dan mengalami proses *quenching* lalu mengeras menjadi solid.

Proses *melt-quench* dari kedua jenis sampel menghasilkan *droplets* dengan perkiraan struktur yang terbentuk adalah struktur kristalin, semi-kristalin, dan amorf pada masing-masing jenis sampel.



Gambar 4.4 *Droplets* hasil proses *melt-quench*. Metakaolin (a) amorf, (b) semi-kristalin, (c) kristalin. Abu terbang *class F* (d) amorf, (e) semi-kristalin, (f) kristalin

Gambar 4.4 menunjukkan *droplets* hasil proses *melt-quench*. Pada masing-masing komposisi ditemukan *droplets* dengan penampakan visual bening, agak buram, dan berwarna putih susu. Gambar 4.4 (a) dan (d) menunjukkan *droplets* dengan penampakan bening. Diperkirakan struktur yang terbentuk pada Gambar 4.4 (a) dan (d) masing-masing secara berturut adalah struktur amorf dari prekursor metakaolin dan struktur amorf dari prekursor abu terbang *class F*. Sementara itu Gambar 4.4 (b) dan (e) menunjukkan *droplets* dengan penampakan agak buram. Diperkirakan struktur yang terbentuk pada Gambar 4.4 (b) dan (e) masing-masing secara berturut adalah struktur semi-kristalin dari prekursor metakaolin dan struktur semi-kristalin dari prekursor abu terbang *class F*. Selain itu, Gambar 4.4

(c) dan (f) menunjukkan *droplets* dengan penampakan berwarna putih susu. Diperkirakan struktur yang terbentuk pada Gambar 4.4 (c) dan (f) masing-masing secara berturut adalah struktur kristalin dari prekursor metakaolin dan struktur kristalin dari prekursor abu terbang *class F*.

Struktur yang dihasilkan pada penelitian ini dipengaruhi oleh *cooling rate* dan juga rasio Si/Al serta elemen paduan lain dalam campuran (dalam hal ini adalah MgO dan CaO pada komposisi abu terbang *class F*).

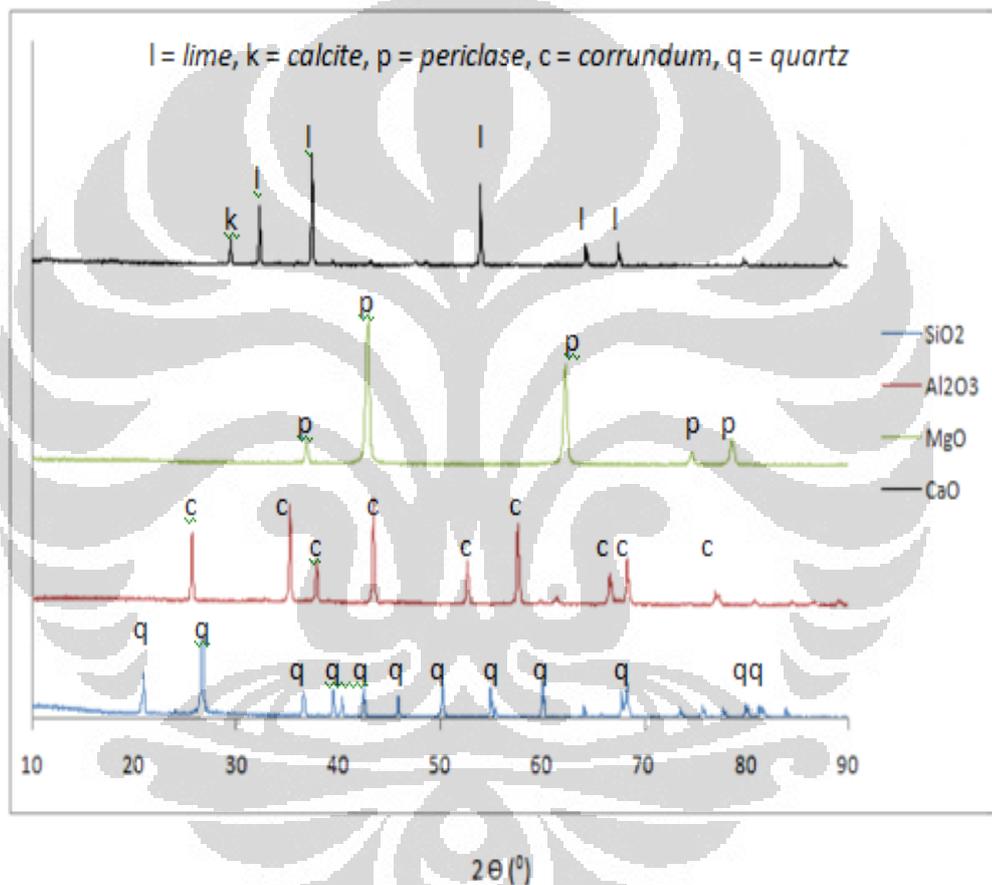
Cooling rate atau kecepatan pendinginan harus dibuat setinggi mungkin untuk menghasilkan struktur yang amorf. Semakin tinggi kecepatan pendinginan maka struktur yang dihasilkan akan memiliki tingkat amorfisitas yang tinggi pula (amorf). Sebagai perbandingan, kecepatan pendinginan dengan metode konvensional dari 0,1 gr sampel menjadi 0,0001 gr *glass* adalah 1500 °C/detik. Sementara saat ini sudah terdapat teknologi yang dapat menghasilkan kecepatan pendinginan di atas 1500 °C/detik untuk massa yang sama, yaitu dengan menggunakan teknik *splat-cooling* [30]. Selain itu, hal yang perlu diperhatikan dalam menjaga kecepatan pendinginan adalah mengusahakan aliran panas las yang merata dan mengatur ketinggian jarak antara las dengan media *quench*, sehingga lelehan tak sempat mendingin di udara.

Komposisi campuran juga mempengaruhi struktur akhir yang terbentuk, dimana semakin besar rasio Si/Al maka struktur amorphous yang diperoleh akan semakin sempurna. Hal ini disebabkan karena Si merupakan *glass former* yang sangat baik. Sementara SiO₂ berperan sebagai *network former* (SiO₄⁴⁻ tetrahedron sebagai unit dasar *network*), Al₂O₃ merupakan jenis material yang disebut sebagai *intermediate* (menggantikan silikon dan menjadi bagian serta menstabilkan *network*). Pada sampel dengan komposisi abu terbang *class F* terdapat MgO dan CaO dalam jumlah sangat sedikit. MgO dan CaO disini berperan sebagai *network modifiers* yang tidak membentuk *polyhedral networks* namun kation dari material ini akan menstabilkan dan memodifikasi SiO₄⁴⁻ *networks*. Penambahan *modifiers* dan *intermediate* ini akan menurunkan titik leleh dan viskositas dari *glass*, serta membuat *glass* semakin mudah terbentuk pada temperatur yang lebih rendah [31].

4.2.1 Karakterisasi Sampel Prekursor *Melt-Quench*

4.2.1.1 Pengujian XRD

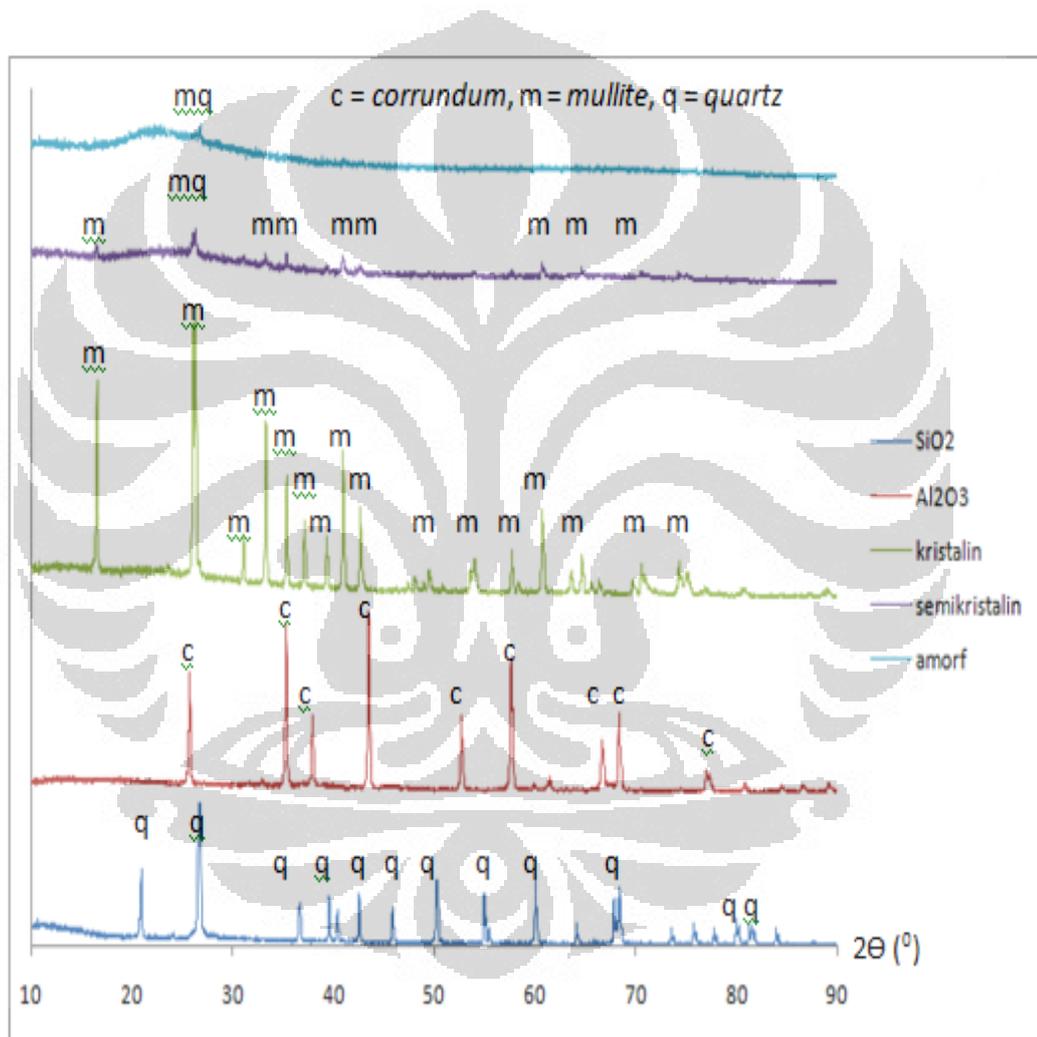
Karakterisasi yang dilakukan pada sampel *melt-quench* adalah pengujian XRD melalui teknik *Wide Angle X-ray Scattering* (WAXS) digunakan untuk mengetahui tingkat kristalinitas dan identifikasi fasa secara kualitatif dari sampel. Sebelum membahas hasil XRD sampel prekursor *melt-quench*, akan disertai grafik XRD dari material awal pembentuk campuran prekursor sebagai rujukan.



Gambar 4.5 Perbandingan grafik XRD SiO₂, Al₂O₃, MgO, dan CaO

Gambar 4.5 menunjukkan perbandingan grafik XRD SiO₂, Al₂O₃, MgO, dan CaO. Puncak dari grafik XRD SiO₂ pada Gambar 4.5 menunjukkan identitas dari material *quartz* dengan simbol 'q'. Puncak dari grafik XRD Al₂O₃ pada Gambar 4.5 menunjukkan identitas dari material *corundum* dengan simbol 'c'. Puncak dari grafik XRD MgO pada Gambar 4.5 menunjukkan identitas dari

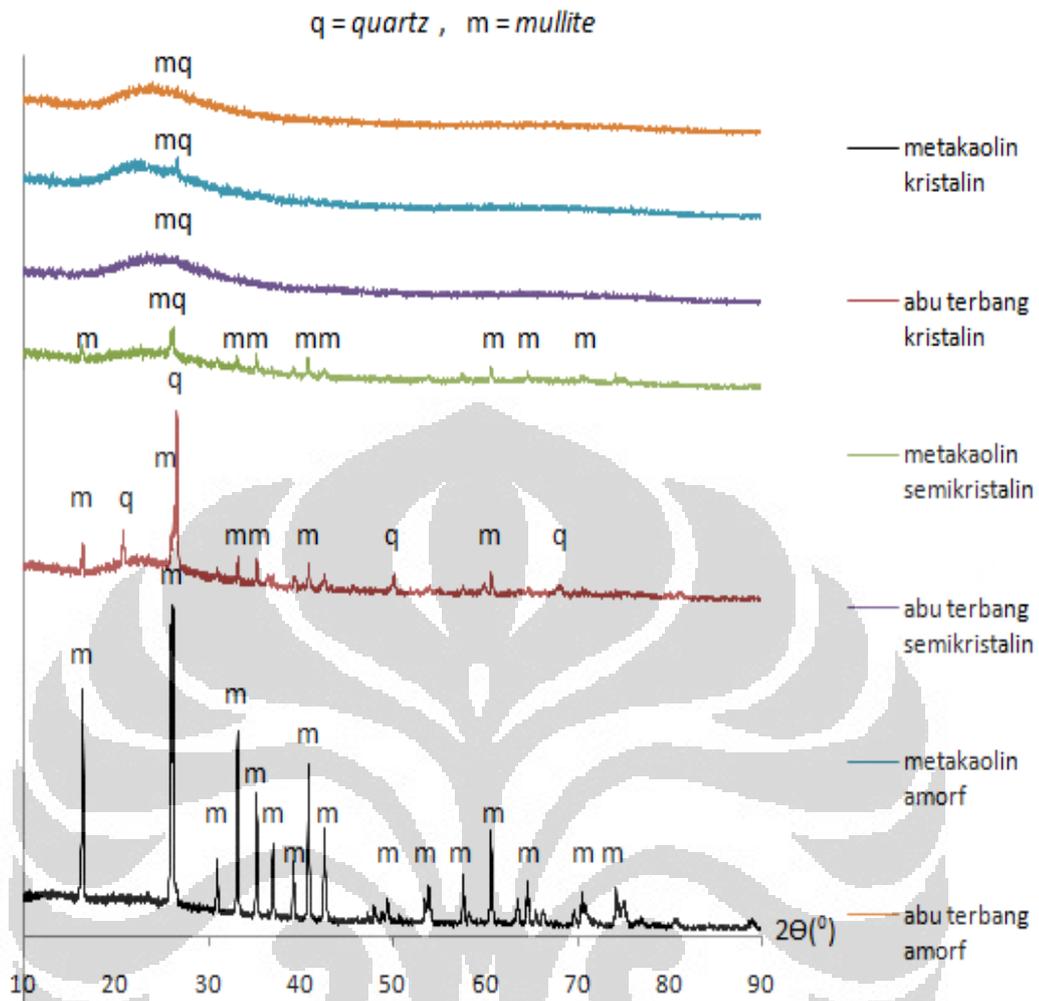
material *periclase* dengan simbol 'p'. Gambar 4.5 juga menunjukkan hasil grafik XRD dari CaO. Dari grafik ini ditemukan adanya senyawa CaO atau *lime* dengan simbol 'l' dan senyawa CaCO₃ atau *calcite* dengan simbol 'k'. Kehadiran senyawa CaCO₃ diperkirakan karena material ini terlalu lama dibiarkan pada udara terbuka. Hal ini dimungkinkan karena *lime* (CaO) tidak stabil pada temperatur kamar atau rendah sehingga dapat bereaksi secara spontan dengan CO₂ untuk membentuk CaCO₃.



Gambar 4.6 Perbandingan hasil XRD prekursor metakaolin *melt-quench*

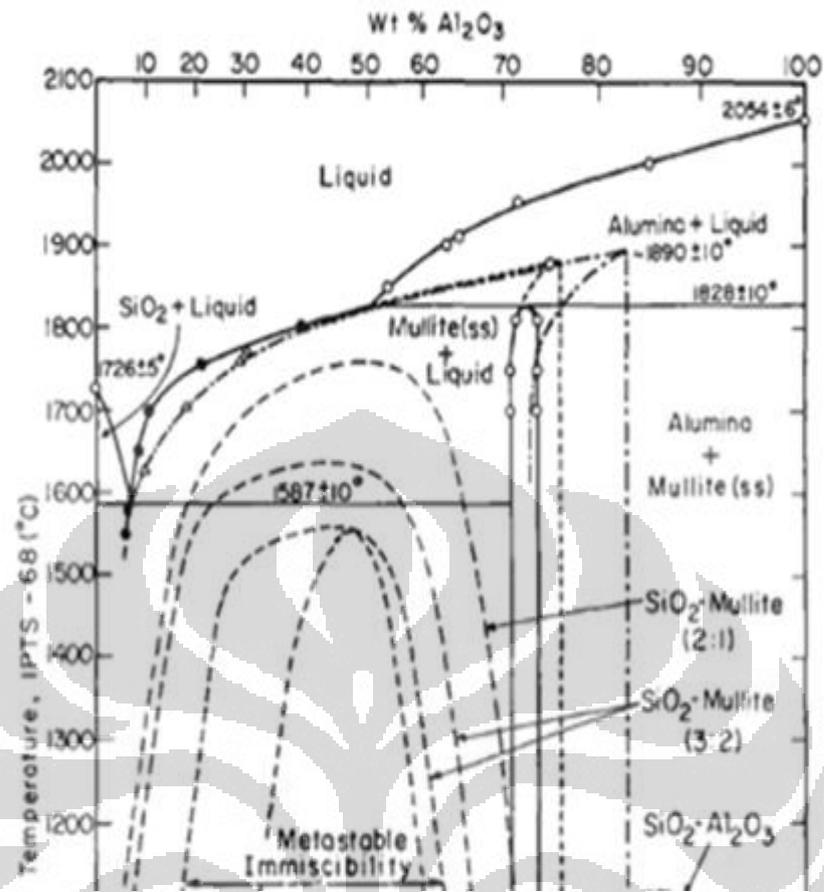
Gambar 4.6 menunjukkan perbandingan hasil XRD prekursor metakaolin *melt-quench*. Dalam penelitian ini, ditemukan *mullite* dan *quartz* pada hasil XRD prekursor metakaolin sintetis, dengan catatan tidak ada *quartz* pada sampel

prekursor metakaolin kristalin. Pada gambar 4.6, puncak *mullite* ditandai dengan 'm', sementara *quartz* dengan 'q'. Pada penelitian ini, diperkirakan *mullite* terbentuk melalui mekanisme nukleasi dan pertumbuhan butir. *Mullite* ini sendiri terbentuk karena adanya disolusi atau pelarutan partikel alumina ke dalam *SiO₂ glass*. Ketika *SiO₂ glass* telah jenuh oleh partikel alumina, maka *mullite* bernukleasi dengan sangat cepat [32]. Sementara proses disolusi berlangsung, butir *mullite* akan mengalami pertumbuhan butir. Pada penelitian ini diperkirakan seluruh partikel alumina telah terdisolusi ke dalam *SiO₂ glass*, hal ini dapat disesuaikan dengan data hasil XRD yang menyatakan tidak terdapatnya partikel alumina (*corundum*). Partikel alumina yang telah terdisolusi ini akan bereaksi dengan *SiO₂* untuk membentuk *mullite* (kristalin). Pada data hasil XRD sampel kaolin sintesis juga menunjukkan bahwa semakin banyak *mullite* yang terbentuk maka semakin sedikit pula *quartz* (kristalin) pada sampel. Hal ini disebabkan karena *quartz* (kristalin) yang terbaca pada XRD adalah sisa-sisa dari fasa *SiO₂ glass* yang tidak ikut bereaksi dengan partikel alumina lalu mengalami pendinginan yang tidak cepat (sempat mendingin di udara sebelum masuk ke dalam media *quench*). Maka semakin banyak *mullite* yang terbentuk, akan semakin sedikit pula *quartz* yang terbaca pada XRD. Hal ini sejalan dengan konsumsi atau penggunaan *SiO₂ glass* oleh partikel alumina untuk membentuk *mullite* [33]. Selain itu juga dari data hasil XRD ditunjukkan bahwa semakin kristalin struktur yang didapat, maka semakin banyak *mullite* dan semakin sedikit *quartz* yang terbentuk. Hal ini dipengaruhi oleh laju pendinginan saat *quenching*, dimana saat laju pendinginan cukup rendah, maka butir-butir *mullite* pun akan tumbuh dan nukleus *mullite* akan sempat bertambah banyak, sehingga kadar *SiO₂* atau *quartz* berkurang.



Gambar 4.8 Perbandingan hasil XRD prekursor metakaolin dan abu terbang *class F melt-quench*

Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan hasil XRD prekursor metakaolin dan abu terbang *class F melt-quench*. Dari Gambar 4.8 diketahui bahwa sampel prekursor abu terbang *class F* memiliki struktur yang lebih amorf daripada sampel prekursor metakaolin. Hal ini diperkirakan terutama karena adanya fenomena *liquid immiscibility* pada kedua jenis sampel yang juga dipengaruhi oleh kandungan pengotor MgO dan CaO pada prekursor abu terbang *class F melt-quench*.



Gambar 4.9 Diagram fasa Al₂O₃-SiO₂ menunjukkan wilayah *metastable immiscibility* (garis putus-putus)

[34]

Gambar 4.9 menunjukkan diagram fasa Al₂O₃-SiO₂ dengan wilayah *metastable immiscibility* (garis putus-putus). Dimana pada wilayah *metastable immiscibility* (garis putus-putus) ini saat terjadi pelelehan akan terbentuk *liquid 1* (kaya akan SiO₂) dan *liquid 2* (kaya akan Al₂O₃) yang tidak saling melarutkan. Namun karena adanya pengaruh kehadiran *modifiers* (MgO dan CaO) pada sampel abu terbang *class F* sintetis, maka *melting point* dan viskositas gelas akan turun, serta gelas akan lebih mudah terbantuk pada temperatur yang lebih rendah [31]. Karena viskositas menjadi lebih rendah, maka *liquid immiscibility* (tidak saling larut) antara *liquid 1* dan *liquid 2* menjadi lebih sempurna [30]. Pengaruh kehadiran *modifiers* pada sampel abu terbang *class F* sintetis menyebabkan *liquid immiscibility* pada sampel ini lebih sempurna dibandingkan dengan sampel kaolin sintetis. Sehingga karena temperatur las yang digunakan ~ 1700 °C (berada sedikit

di atas *consulate point* dari *metastable immiscibility diagram*), dengan *consulate point* dari sampel dengan komposisi abu terbang *class F* lebih dekat ke temperatur las dibandingkan *consulate point* dari sampel dengan komposisi metakaolin, maka *mullite* yang terbentuk pada sampel abu terbang *class F* sintetis lebih sedikit dibandingkan dengan sampel metakaolin sintetis. Sebab pada sampel abu terbang *class F* sintetis hanya sedikit partikel alumina yang dapat terdisolusi atau larut ke dalam SiO_2 glass sebelum akhirnya berhenti larut pada wilayah *metastable immiscibility* saat mengalami *quenching*.

Selain itu juga diperkirakan pada prekursor dengan komposisi ini akan terbentuk fasa campuran *gehlenite* ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) dan *akermanite* ($2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$), sebagai *depolymerized calcium silicate glass* yang bersifat sangat reaktif dalam medium alkali. Fasa campuran ini terbentuk karena adanya pengotor CaO dan MgO pada prekursor abu terbang *class F* sintetis. *Gehlenite* dan *akermanite* ini dapat berbentuk gelas atau kristalin tergantung pada laju pendinginannya [29]. Namun tak terbaca pada grafik XRD diperkirakan karena fasa ini memiliki struktur yang amorf atau dikarenakan kandungan pengotor CaO dan MgO dalam prekursor ini sangat sedikit.

4.3 Pembuatan Geopolimer

Geopolimer dibuat dengan mereaksikan sampel prekursor *melt-quench* (amorf, semi-kristalin, kristalin) dari masing-masing kedua jenis sampel tersebut dengan komposisi yang sudah disebutkan pada subbab 3.3. Sebelum direaksikan dengan alkali aktivator, sampel prekursor di *milling* dengan menggunakan *planetary ball mill* untuk mendapatkan ukuran partikel yang lebih kecil agar reaksi polimerisasi dapat berjalan dengan baik. Setelah terbentuk pasta geopolimer, masing-masing sampel dimasukkan ke dalam cetakan lalu oven nabertherm untuk di *curing* selama 24 jam pada temperatur 90°C .



Gambar 4.10 Geopolimer dalam cetakan

Gambar 4.10 menunjukkan geopolimer dalam cetakan. Hasil akhir geopolimer memiliki dimensi yang berbeda dan tidak beraturan dari dimensi yang direncanakan di awal (diameter 1,5 cm dan panjang 3 cm). Hal ini dikarenakan cetakan selang yang tidak memiliki kestabilan dimensi yang baik sehingga geopolimer yang mengembang dapat menekan cetakan ke arah luar.



Gambar 4.11 Geopolimer setelah *curing*. Dari kiri ke kanan adalah metakaolin prekursor *glassy*, metakaolin prekursor semikristalin, abu terbang *class F* prekursor *glassy*, abu terbang *class F* prekursor semikristalin

Gambar 4.11 menunjukkan geopolimer setelah *curing*. Pada sampel geopolimer dari prekursor metakaolin sintesis amorf, ditemukan sejumlah *residual solution content*. Hal ini menandakan bahwa material belum mengalami reaksi yang sempurna selama geopolimerisasi. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain adalah karena kurangnya kemampuan air untuk mengakses semua

permukaan dalam partikel (yang dapat mencegah disolusi yang sempurna) atau juga dapat disebabkan oleh karena adanya kehadiran fasa amorf yang non-reaktif [35]. Sedangkan pada sampel geopolimer dari prekursor abu terbang *class F* sintesis amorf, ditemukan sebagian wilayah dari sampel yang berwarna abu-abu dan mengkilap (lingkaran merah pada Gambar 4.11). Wilayah itu merupakan hasil dari sejumlah prekursor yang tidak dapat mengalami geopolimerisasi. Hal ini diperkirakan disebabkan oleh karena adanya sebagian jumlah prekursor amorf dengan ukuran masih cukup besar yang ikut ke dalam pencampuran pasta geopolimer. Ukuran yang terlampau besar tidak akan dapat mengalami reaksi geopolimerisasi. Ukuran yang masih besar ini dikarenakan kurang lamanya proses *milling* prekursor amorf sehingga tidak semua *droplets*-nya mengalami reduksi ukuran yang ideal. Seharusnya *milling* dilakukan lebih lama mengingat *droplets* prekursor abu terbang *class F* amorf memiliki kekerasan yang lebih tinggi.

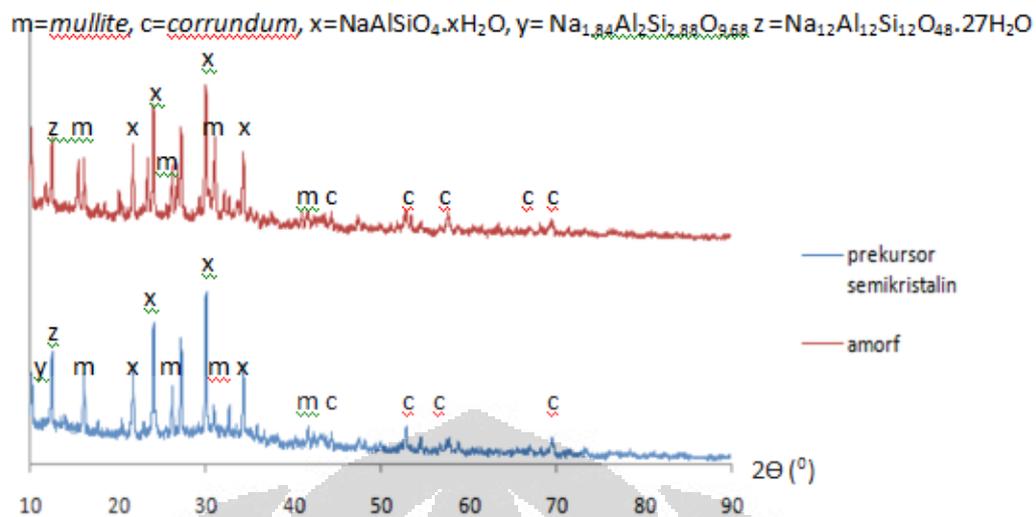
Pada prekursor dengan struktur kristalin dari kedua jenis sampel tidak terjadi reaksi geopolimerisasi. Hal ini dikarenakan struktur kristalin merupakan prekursor yang non-reaktif dalam medium alkali.

4.3.1 Karakterisasi Sampel Geopolimer

4.3.1.1 Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan kepada sampel geopolimer metakaolin sintesis amorf dan semikristalin serta geopolimer abu terbang *class F* sintesis amorf dan semikristalin. Pada prekursor kristalin dari masing-masing jenis komposisi tidak terjadi reaksi geopolimerisasi, sehingga tidak tercipta sampel geopolimer dan tidak dapat dilakukan pengujian XRD pada sampel tersebut.

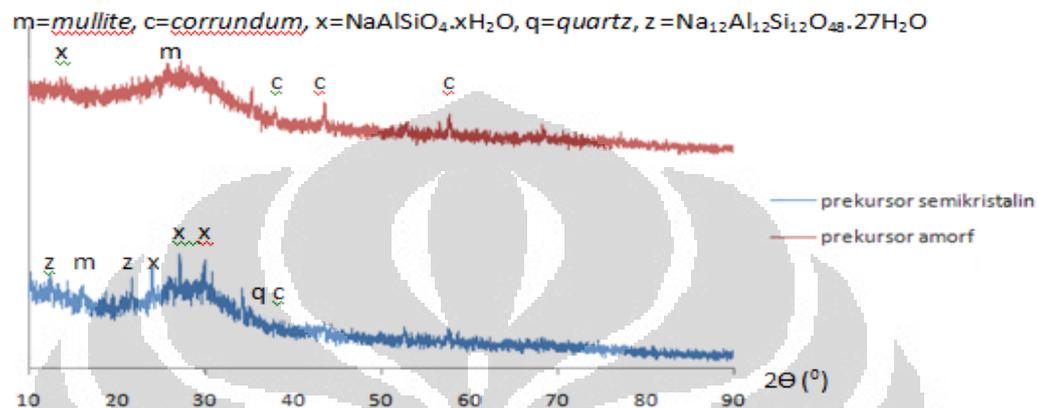
Dalam pengujian XRD pada sampel geopolimer diperkirakan prekursor yang memiliki struktur lebih amorf akan membentuk geopolimer dengan struktur yang lebih amorf pula sehingga menghasilkan struktur yang lebih *rigid*.



Gambar 4.12 Hasil XRD sampel geopolimer metakaolin sintetis

Gambar 4.12 menunjukkan hasil XRD sampel geopolimer metakaolin sintetis. Pada grafik terdapat puncak-puncak dengan simbol ‘m’ (*mullite* / $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), ‘a’ (*corrundum* / Al_2O_3), ‘x’ ($\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), ‘y’ ($\text{Na}_{1,84}\text{Al}_2\text{Si}_{2,88}\text{O}_{9,68}$), dan ‘z’ ($\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$). Gambar 4.12 menunjukkan adanya *mullite* pada kedua jenis sampel kaolin sintetis yang diperkirakan berasal dari prekursor yang masih mengandung *mullite* yang tidak ikut bereaksi. Hal ini dikarenakan *mullite* kristalin memiliki *bonding strength* yang kuat sehingga tak dapat diputus oleh ion hidroksil dan terdisolusi. Selain *mullite*, terdapat *corrundum* pada grafik XRD geopolimer metakaolin sintetis. Selain itu juga terdapat tiga puncak yang mewakili spesies-spesies zeolit kristalin. Salah satunya adalah ‘y’ ($\text{Na}_{1,84}\text{Al}_2\text{Si}_{2,88}\text{O}_{9,68}$), dimana struktur kristalin dari spesies ini lebih banyak ditemukan pada sampel geopolimer metakaolin sintetis semikristalin. Hal ini dapat dilihat pada perbandingan kedua grafik pada $2\theta = 11,72^\circ$. Pada grafik XRD geopolimer metakaolin sintetis amorf, tepatnya pada $2\theta = 11,72^\circ$ tidak ditemukan adanya ‘y’ ($\text{Na}_{1,84}\text{Al}_2\text{Si}_{2,88}\text{O}_{9,68}$) kristalin. Diperkirakan pada posisi 2θ tersebut dalam grafik XRD geopolimer kaolin sintetis amorf, spesies ini memiliki struktur amorf. Hal ini disebabkan karena prekursor amorf akan cenderung menghasilkan struktur geopolimer yang amorf pula. Dua spesies zeolit yang lain adalah spesies yang masih terdapat kehadiran air (H_2O) yaitu, ‘x’ ($\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) dan ‘z’ ($\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$). Hal ini disebabkan karena air berperan sebagai katalis

yang memfasilitasi disolusi monomer alumina dan silika selama polimerisasi. Namun rasio reaksi maksimum berkorelasi dengan rasio evolusi maksimum air, sehingga jika jumlah air berlebihan akan menyebabkan terbentuknya fasa yang mengandung H_2O [35]. Kehadiran fasa zeolit kristalin ini dapat mengurangi kekuatan mekanis [36].



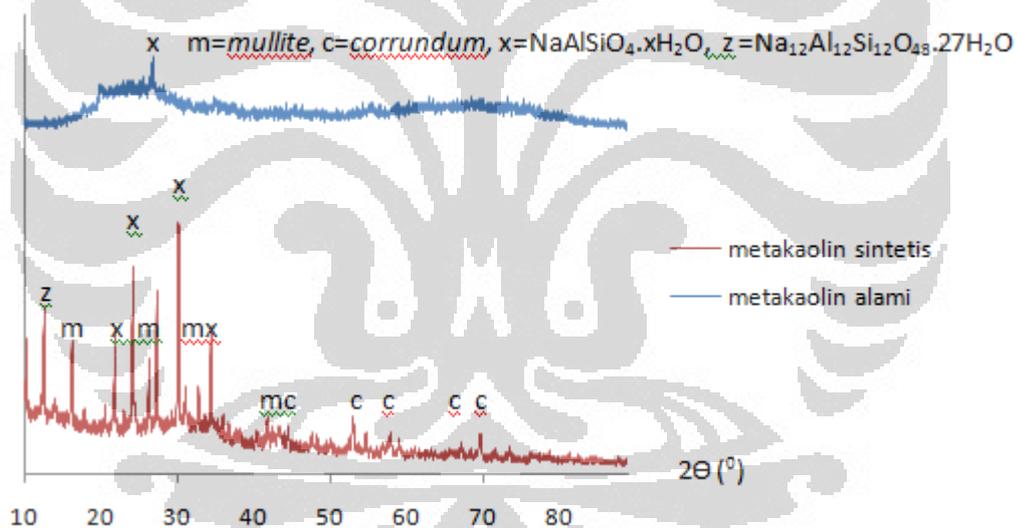
Gambar 4.13 Hasil XRD sampel geopolimer abu terbang sintetis

Gambar 4.13 menunjukkan hasil XRD sampel geopolimer abu terbang sintetis. Berdasarkan Gambar 4.13, ditemukan adanya 'm' (*mullite* / $Al_6Si_2O_{13}$) pada sampel geopolimer dari prekursor *glassy* dan semi-kristalin. *Mullite* diperkirakan berasal dari prekursor *melt-quench* yang tidak ikut bereaksi dalam proses geopolimerisasi. Hal ini dikarenakan *mullite* kristalin memiliki *bonding strength* yang kuat sehingga tak dapat diputus oleh ion hidroksil dan terdisolusi. Selain *mullite*, terdapat 'a' (*corundum* / Al_2O_3) pada grafik XRD geopolimer abu terbang sintetis dari prekursor *glassy* dan semi-kristalin. Selanjutnya juga ditemukan adanya spesies zeolit 'x' ($NaAlSiO_4 \cdot xH_2O$) kristalin pada kedua grafik dari prekursor *glassy* dan semi-kristalin. Namun, pada geopolimer dari sampel semi-kristalin memiliki spesies zeolit 'x' ($NaAlSiO_4 \cdot xH_2O$) kristalin yang lebih banyak. Hal ini ditandai dengan tidak terdapatnya puncak pada $2\theta = 22,50^\circ$, $24,30^\circ$, dan $30,00^\circ$ dalam grafik geopolimer dari prekursor *glassy*. Selanjutnya ditemukan puncak 'z' ($Na_{12}Al_{12}Si_{12}O_{48} \cdot 27H_2O$) pada $2\theta = 12,50^\circ$ dan $21,74^\circ$ hanya dalam grafik geopolimer dari prekursor semi-kristalin. Kehadiran fasa zeolit kristalin ini dapat mengurangi kekuatan mekanis [36]. Kehadiran 'q'

(*quartz*) pada grafik semikristalin diperkirakan berasal dari *quartz* prekursor yang tidak ikut bereaksi, dan jumlahnya cukup untuk dapat terbaca pada grafik XRD.

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan, didapati bahwa struktur geopolimer yang dihasilkan dari kedua jenis prekursor ini tidak amorf sempurna (ditandai dengan adanya puncak-puncak dari fasa kristalin tertentu). Diketahui bahwa sampel geopolimer dari prekursor abu terbang *class F glassy* sintetis memiliki struktur yang paling amorf, dilanjutkan oleh sampel geopolimer dari prekursor abu terbang *class F* semi-kristalin sintetis, sampel geopolimer metakaolin *glassy* sintetis, dan sampel geopolimer metakaolin semi-kristalin sintetis. Hal ini dipengaruhi oleh komposisi Na_2O , dimana semakin tinggi kandungan Na_2O akan cenderung membentuk fasa zeolit (Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) amorphous yang mudah mengalami kristalisasi [36]. Hal ini sesuai dengan keberadaan fasa zeolit (Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O) kristalin yang lebih banyak pada sampel geopolimer metakaolin, dimana komposisi pasta geopolimer memiliki kandungan Na_2O yang lebih tinggi (lihat subbab 3.3). Selain itu, struktur geopolimer yang terbentuk juga dipengaruhi oleh keberadaan ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} pada sampel geopolimer abu terbang *class F* sintetis. Dimana keberadaan ion-ion modifier ini mendorong terbentuknya *framework disorder* atau kekacauan rantai geopolimer yang memberi struktur amorphous [37]. Dalam geopolimer kunci untuk membentuk rantai adalah kation Al^{3+} dan Si^{4+} , sedangkan ion divalent Ca^{2+} dan Mg^{2+} berperan sebagai *network modifier* yang dapat memberi *charge balance* yang diperlukan untuk membentuk aluminium tetrahedral dan juga *depolymerizing glass network* jika kandungannya berlebih. Perbedaan antara ion Na^+ (medium alkali) dengan ion Mg^{2+} dan Ca^{2+} (pengotor) sebagai *charge balancer* yaitu dilihat dari seberapa besar ion-ion ini dapat memutus rantai aluminosilikat, dimana kation pengotor cenderung lebih dahulu memutuskan rantai lalu kemudian kation Na^+ [38]. Selain itu kehadiran ion pengotor ini akan mempercepat waktu *curing* karena menghasilkan *heterogeneous nucleation center* [39]. Pada penelitian ini, diperkirakan kandungan pengotor pada sampel abu terbang *class F* tidak berlebih karena jumlahnya sangat sedikit, yaitu hanya 6 %w untuk MgO dan 2 %w untuk CaO. Struktur amorphous geopolimer abu terbang *class F* sintetis juga dipengaruhi dengan kemungkinan keberadaan fasa campuran *gehlenite*

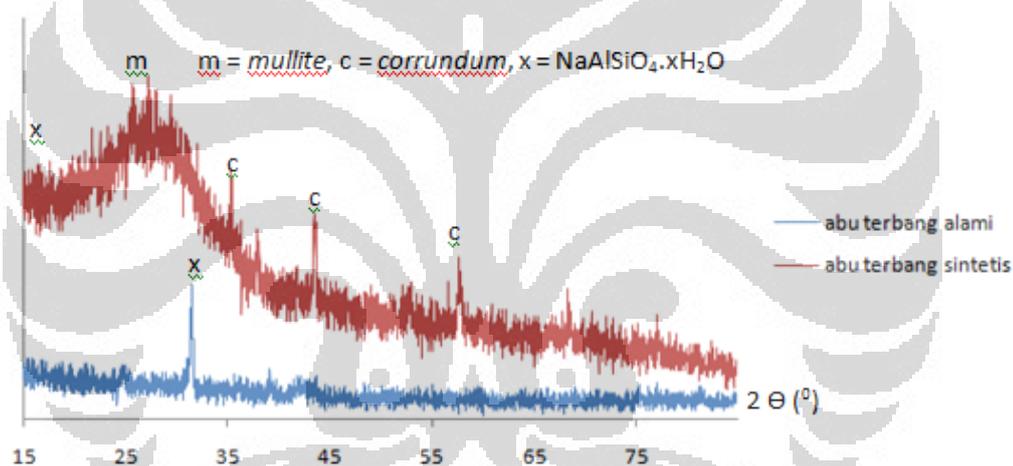
($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) dan *akermanite* ($2\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$) pada prekursor, sebagai *depolymerized calcium silicate glass* yang bersifat sangat reaktif dalam medium alkali. Fasa campuran ini terbentuk karena adanya pengotor CaO dan MgO pada prekursor abu terbang *class F* sintetis. *Gehlenite* dan *akermanite* ini dapat berbentuk gelas atau kristalin tergantung pada laju pendinginannya [29]. Dengan adanya struktur yang lebih amorphous pada sampel geopolimer *class F* sintetis, maka akan dihasilkan struktur yang lebih rigid sehingga diperkirakan nilai kuat tekan yang dihasilkan pada sampel ini akan lebih tinggi dibandingkan dengan sampel geopolimer metakaolin sintetis. Hal ini sesuai dengan data XRD *melt-quench* yang menyatakan sampel prekursor abu terbang *class F* sintetis lebih amorf, yang akan menyebabkan rantai lebih fleksibel saat reaksi geopolimerisasi dan akan menghasilkan struktur yang lebih *rigid* dan kompleks.



Gambar 4.14 Perbandingan grafik XRD geopolimer metakaolin alami dan sintetis (dari prekursor *glassy*)

Gambar 4.14 menunjukkan perbandingan grafik XRD antara geopolimer metakaolin alami [40] dengan geopolimer metakaolin sintetis (dari prekursor *glassy*). Grafik geopolimer metakaolin alami menunjukkan wilayah yang lebih landai yang mengindikasikan bahwa material ini memiliki struktur yang sangat amorf. Dari perbandingan grafik ini hanya dapat diperkirakan bahwa spesies zeolit yang terdapat pada geopolimer metakaolin alami ini adalah 'x' ($\text{NaAlSiO}_4\cdot x\text{H}_2\text{O}$)

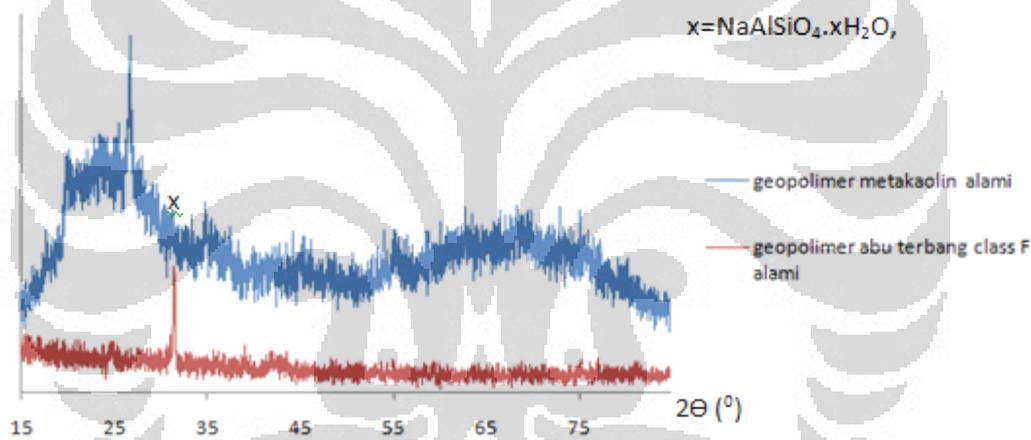
kristalin. Identifikasi ini dilakukan dengan membandingkan puncak yang terdapat pada kedua grafik tersebut. Dikarenakan grafik geopolimer metakaolin alami berbentuk landai atau amorphous, maka didapatkan kesulitan dalam mengidentifikasi puncaknya. Puncak yang cukup jelas terdapat pada $2\theta = 24,30^\circ$. Dengan adanya puncak pada posisi sudut tersebut, diperkirakan spesies zeolit kristalin yang terbentuk adalah 'x' ($\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) kristalin. Struktur amorf yang lebih baik dari geopolimer alami ini diperkirakan berasal dari komposisi metakaolin alami yang masih mengandung pengotor atau dari perlakuan pada prekursor yang membantu menghasilkan struktur yang lebih amorf. Geopolimer dari metakaolin alami ini diprediksikan akan memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi.



Gambar 4.15 Perbandingan grafik XRD geopolimer abu terbang *class F* alami dan sintetis (dari prekursor *glassy*).

Gambar 4.15 menunjukkan perbandingan grafik XRD antara geopolimer abu terbang *class F* alami [41] dan sintetis (dari prekursor *glassy*). Grafik geopolimer abu terbang *class F* alami menunjukkan wilayah yang lebih landai yang mengindikasikan bahwa material ini memiliki struktur yang sangat amorf. Dari perbandingan grafik ini hanya dapat diperkirakan bahwa spesies zeolit yang terdapat pada geopolimer abu terbang *class F* alami dan sintetis (dari prekursor *glassy*) ini adalah 'x' ($\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) kristalin. Identifikasi ini dilakukan dengan membandingkan puncak yang terdapat pada kedua grafik tersebut.

Dikarenakan grafik geopolimer abu terbang *class F* alami dan sintesis (dari prekursor *glassy*) ini berbentuk landai atau amorf, maka didapatkan kesulitan dalam mengidentifikasi puncaknya. Puncak yang cukup jelas terdapat pada $2\theta = 31,80^\circ$. Dengan adanya puncak pada posisi sudut tersebut, diperkirakan spesies zeolit kristalin yang terbentuk adalah 'x' ($\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) kristalin. Struktur amorf yang lebih baik dari geopolimer alami ini diperkirakan berasal dari komposisi abu terbang *class F* alami yang memiliki komposisi prekursor, ukuran partikel yang lebih baik, atau sejarah perlakuan yang membantu menghasilkan struktur yang lebih amorf (mengingat komposisi pasta geopolimer dan temperatur serta waktu *curing* adalah sama). Geopolimer dari abu terbang *class F* alami ini diprediksikan akan memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi.



Gambar 4.16 Perbandingan grafik XRD geopolimer metakaolin alami dan geopolimer abu terbang *class F* alami

Gambar 4.16 menunjukkan perbandingan grafik XRD antara geopolimer metakaolin alami [40] dan geopolimer abu terbang *class F* alami [41]. Berdasarkan grafik ditunjukkan bahwa geopolimer abu terbang *class F* alami memiliki struktur yang lebih amorphous. Dimana kedua material ini memiliki sejumlah kecil spesies 'x' ($\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) kristalin. Faktor-faktor yang diperkirakan mempengaruhi kristalinitas antara kedua material ini adalah komposisi prekursor, ukuran partikel prekursor, komposisi pasta geopolimer (komposisi Na_2O , komposisi air, konsentrasi NaOH), serta sejarah perlakuan

material atau prekursor. Namun sulit untuk menentukan faktor dominan yang mempengaruhi struktur geopolimer yang terbentuk, karena minimalnya data dari sejarah geopolimer metakaolin alami dan geopolimer abu terbang *class F* alami ini.

4.3.1.2 Pengujian Kuat Tekan

Sampel yang mengalami uji kuat tekan adalah sampel geopolimer metakaolin sintetis (dari prekursor *glassy* dan semikristalin) dan sampel geopolimer abu terbang *class F* sintetis (dari prekursor *glassy* dan semikristalin).

Kuat tekan dipengaruhi oleh luas permukaan yang dikenai oleh beban. Nilai kuat tekan (σ) didapat berdasarkan persamaan :

$$\sigma = F/A \quad (4.2)$$

dengan :

σ = kuat tekan (Mpa)

F = beban maksimum (N)

A = luas permukaan sampel (mm²)

Tabel 4.1 Nilai kuat tekan sampel geopolimer prekursor alami

Sampel Geopolimer Prekursor Alami	σ (MPa)
Metakaolin	26,133
Abu terbang <i>class F</i>	43,773

[40], [41]

Tabel 4.1 menunjukkan nilai kuat tekan sampel geopolimer prekursor alami. Nilai kuat tekan pada Tabel 4.1 merupakan nilai kuat tekan rata-rata yang diambil dari tiga buah sampel geopolimer dengan prekursor metakaolin alami [40] dan prekursor abu terbang *class F* alami [41]. Berdasarkan Tabel 4.1, diketahui nilai kuat tekan geopolimer metakaolin alami adalah 26,133 MPa dan nilai kuat tekan geopolimer abu terbang *class F* alami adalah 43,773 MPa. Hal ini sesuai dengan prediksi dengan melihat data grafik XRD kedua material tersebut yaitu,

nilai kuat tekan geopolimer abu terbang *class F* alami lebih tinggi daripada nilai kuat tekan geopolimer metakaolin alami.

Tabel 4.2 Nilai kuat tekan sampel geopolimer prekursor sintetis

Sampel Geopolimer Prekursor Sintetis	F (N)	A (mm²)	σ (MPa)
Metakaolin <i>glassy</i>	100	176,6	0,567
Metakaolin semikristalin	900	176,6	5,096
Abu terbang <i>class F glassy</i>	1600	176,6	9,060
Abu terbang <i>class F</i> semikristalin	2700	176,6	15,289

Tabel 4.2 menunjukkan nilai kuat tekan sampel geopolimer prekursor sintetis. Pada penelitian ini nilai kuat tekan dari keempat sampel dari prekursor sintetis ini (lihat tabel 4.2) sangat berbeda jauh dari prediksi. Dimana prediksi menyatakan sampel geopolimer prekursor sintetis yang memiliki nilai kuat tekan tertinggi adalah sampel abu terbang *class F* dari prekursor *glassy*, diikuti sampel abu terbang *class F* dari prekursor semikristalin, sampel metakaolin dari prekursor *glassy*, dan terakhir sampel metakaolin dari prekursor semikristalin. Namun jika keempat sampel geopolimer prekursor sintetis ini dibandingkan dengan geopolimer alami, maka nilai kuat tekan keempat sampel geopolimer prekursor sintetis ini akan berada di bawah geopolimer prekursor alami, dimana nilai kuat tekan tertinggi dimiliki oleh geopolimer abu terbang *class F* alami lalu diikuti dengan geopolimer metakaolin alami. Prediksi ini didasarkan pada hasil XRD yang memberi informasi kristalinitas serta fasa-fasa yang terbentuk pada setiap sampel tersebut. Semakin amorf struktur geopolimer yang dihasilkan, dengan semakin sedikit jumlah spesies zeolit kristalin, maka nilai kuat tekan yang dihasilkan akan semakin tinggi. Struktur amorf yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh reaktivitas prekursor dalam medium alkali dengan faktor-faktor yang sudah dibahas pada subbab-subbab tentang hasil penelitian dan pembahasan sebelumnya. Ketidaksesuaian antara data aktual dengan prediksi pada sampel geopolimer prekursor sintetis ini diperkirakan oleh beberapa hal. Salah satunya adalah karena nilai kuat tekan sangat dipengaruhi oleh permukaan bagian atas

sampel yang meliputi luas permukaan tersebut dan datar atau tidaknya permukaan tersebut. Selain itu juga nilai kuat tekan dipengaruhi oleh spesifikasi dimensi yang sesuai, yaitu rasio antara diameter : panjang adalah 1 : 2. Pada penelitian ini sampel uji kuat tekan memiliki permukaan yang tidak datar serta dimensi yang sangat tidak memenuhi spesifikasi dimensi uji kuat tekan. Ketidakteraturan dimensi ini disebabkan karena kesalahan dalam memilih cetakan *curing* pasta geopolimer. Cetakan yang dipilih terbuat dari selang sehingga tak memiliki kestabilan dimensi yang baik dan membuat geopolimer dapat menekan ke arah luar sehingga bentuk sampel menjadi cembung dan cenderung tak beraturan. Selain itu nilai kuat tekan sampel geopolimer metakaolin dari prekursor sintesis *glassy* yang sangat kecil dipengaruhi oleh keadaan sampel yang masih memiliki *residual solution content*, sehingga sampel dalam keadaan basah atau tidak kering. Nilai kuat tekan sampel geopolimer abu terbang *class F* dari prekursor sintesis *glassy* juga dipengaruhi oleh adanya sebagian wilayah dari sampel yang tidak bereaksi saat proses *curing*. Padahal berdasarkan prediksi, seharusnya nilai kuat tekan dari sampel ini adalah yang tertinggi dari ketiga sampel geopolimer prekursor sintesis yang lainnya. Karena hal-hal tersebut, perbandingan nilai kuat tekan antara keempat sampel geopolimer dari prekursor sintesis tersebut, atau perbandingan dengan geopolimer dari prekursor alami menjadi tidak tepat.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan data-data yang diperoleh melalui penelitian ini dan analisa yang mengacu pada landasan teori serta literatur, maka dapat disimpulkan bahwa :

- a) Prekursor yang memiliki struktur dengan amorfisitas lebih tinggi merupakan prekursor yang lebih reaktif dalam medium alkali
- b) Pada jenis prekursor yang sama, prekursor non-sintetis (alami) memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan prekursor sintetis. Hal ini ditunjukkan dengan data yang diperoleh melalui penelitian ini yaitu, prekursor metakaolin alami memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dalam proses geopolimerisasi daripada prekursor metakaolin sintetis. Sementara itu, prekursor abu terbang *class F* alami juga memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dalam proses geopolimerisasi daripada prekursor abu terbang *class F* sintetis
- c) Prekursor abu terbang *class F* memiliki reaktivitas yang lebih tinggi daripada prekursor metakaolin, baik dalam lingkup prekursor yang sama-sama sintetis maupun alami. Hal ini ditunjukkan dengan data yang diperoleh melalui penelitian ini yaitu, prekursor abu terbang *class F* sintetis memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dalam proses geopolimerisasi daripada prekursor metakaolin sintetis. Tak hanya itu, penelitian juga menunjukkan bahwa prekursor abu terbang *class F* alami memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dalam proses geopolimerisasi daripada prekursor metakaolin alami.
- d) Prekursor sintetis yang memiliki amorfisitas tertinggi berturut-turut adalah :
 - Abu terbang *class F* amorf.
 - Abu terbang *class F* semikristalin.
 - Metakaolin amorf.
 - Metakaolin semikristalin.
 - Abu terbang *class F* kristalin.
 - Metakaolin kristalin.

- e) Fasa-fasa yang terbentuk pada prekursor sintetis adalah :
- Metakaolin amorf : *mullite* dan *quartz*.
 - Metakaolin semikristalin : *mullite* dan *quartz*.
 - Metakaolin kristalin : hanya ditemukan *mullite* saja.
 - Abu terbang *class F* amorf : *mullite* dan *quartz*.
 - Abu terbang *class F* semikristalin : *mullite* dan *quartz*.
 - Abu terbang *class F* kristalin : *mullite* dan *quartz*.
- f) Geopolimer yang memiliki amorfisitas tertinggi berturut-turut adalah :
- Abu terbang *class F* alami.
 - Metakaolin alami.
 - Abu terbang *class F* amorf.
 - Abu terbang *class F* semikristalin.
 - Metakaolin amorf.
 - Metakaolin semikristalin.
- g) Fasa-fasa yang terbentuk pada geopolimer adalah :
- Abu terbang *class F* alami : $\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.
 - Metakaolin alami : $\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.
 - Abu terbang *class F glassy* sintetis : *mullite* / $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$. *corrundum* Al_2O_3 , $\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.
 - Abu terbang *class F* semikristalin sintetis : *mullite* / $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$. *corrundum* / Al_2O_3 , $\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$, *quartz*.
 - Metakaolin *glassy* sintetis : *mullite* / $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$, *corrundum* / Al_2O_3 , $\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_{1,84}\text{Al}_2\text{Si}_{2,88}\text{O}_{9,68}$, $\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$.
 - Metakaolin semikristalin sintetis : *mullite* / $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$. *corrundum* / Al_2O_3 , $\text{NaAlSiO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_{1,84}\text{Al}_2\text{Si}_{2,88}\text{O}_{9,68}$, $\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$.
- h) Geopolimer dengan kuat tekan tertinggi berturut-turut (tidak presisi) adalah :
- Abu terbang *class F* alami : 43,773 MPa.
 - Metakaolin alami : 26,133 MPa.
 - Abu terbang *class F* semikristalin sintetis : 15,289 MPa.
 - Abu terbang *class F glassy* sintetis : 9,060 MPa.
 - Metakaolin semikristalin sintetis : 5,096 MPa.
 - Metakaolin *glassy* sintetis : 0,567 MPa.

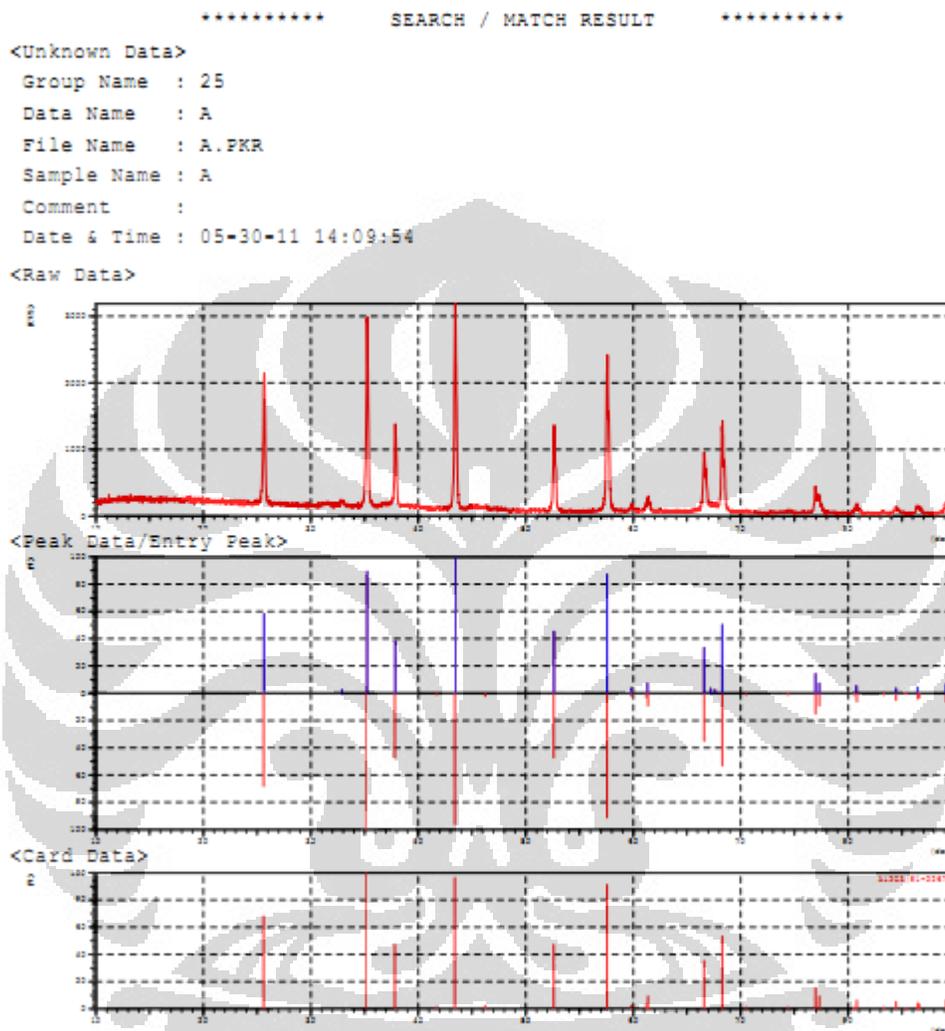
DAFTAR PUSTAKA

1. Cathy, P. (2008, 20 July). Asphalt costs bring concrete into play. *Denver Business Journal*, p : 13.
2. Davidovits, J. (2002). *Environmentally driven geopolymer cement applications*. Proceeding at the Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Australia.
3. Davidovits, J. (2002). *30 Years of successes and failures in geopolymer applications, market trends and potential breakthroughs*. Proceeding at the Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Australia.
4. American Coal Ash Association.(n.d). *CCP production and use survey*. Mei20,2011 <http://acaaffiniscape.com/displaycommon.cfm?an=1&subarticlenbr=3>
5. Davidovits, J. (1994). Global warming impact on the cement and aggregates industries. In *World Resource Review* (vol. 6, No. 2, pp. 263-278).
6. Duxson, P., & Provis, J. L. (2008). Designing precursors for geopolymer cements. *Journal. American Ceramic Society*. Vol: 91 (12), p: 3864-3869.
7. Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., & van Deventer, J. (2005). *Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemistry Engineering Aspects*. Vol: 292, p: 8-20.
8. Davidovits, J. (1994). *Properties of geopolymer cements*. Proceeding at First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. Kiev, Ukraine.
9. Deer, W.A., Howie, R.A., & Zussman, J. (1992). *An introduction to the rock-forming minerals* (2nd ed.). Harlow: Longman, p: 37-46.
10. Bellotto, M., Gualtieri, A., Artioli, G., & Clark, S.M. (1995). Kinetic study of the kaolinite-mullite reaction sequence. Part I: kaolinite dehydroxylation. *Phys. Chem. Minerals* 22: 207–214.
11. Department of Primary Industry. *Earth resources industry. Kaoline*. June 15, 2011 <http://new.dpi.vic.gov.au/earth-resources/industries/minerals/industrial/kaolin>
12. Zhang Z. (2007). Activating process of geopolymer source material: kaolinite. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* Vol.24 No.1

13. Gourley, J. T. (2003). *Geopolymers; opportunities for environmentally friendly construction materials*. Proceeding at the Materials 2003 Conference : Adaptive Materials for a Modern Society, Sydney.
14. Malhotra, V.M. (1999). Making concrete greener with fly ash. *ACI Concrete Int* 21, 61-66.
15. American Concrete Institute. *Use of Fly Ash in Concrete*. ACI 232.2R-03. Jan 01, 2003.
16. Bhanumathidas, N., & Kalidas, N. (2004). Fly ash for sustainable development. *Ark Communications*, Chennai, p 2.
17. Heri T. Putranto. (2007). *Coal fly ash conversion to zeolite for removal of chromium and nickel from wastewaters*. Chemical Engineering, Institute Technology Bandung, Bandung, Indonesia.
18. ASTM C 618 - 08 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *ASTM International*. Retrieved 2008-09-18.
19. Marinda Putri. (2010). Batubara sebagai adsorben. *Majari Magazine*.
<http://majarimagazine.com/2008/06/abu-terbang-batubara-sebagai-adsorben> (diakses pada 1 Juni 2011).
20. van Jaarsveld, J. G. S., van Deventer, J. S. J., & Lukey, G. C. (2003). The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters*, 57(7), 1272-1280.
21. Thebloghub. (2010). Abu batubara: Komposisi kimia.
<http://thebloghub.com/pages/ABU-BATUBARA> (diakses pada 1 Juni 2011)
22. Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2003). *Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements*. *Fuel*, vol 82(18), pp. 2259-2265.
23. Daniel K., Sanjayan J., & Sagoe-Crentsil K. (2006). *The Behaviour of Geopolymer Paste and Concrete at Elevated Temperatures*, International Conference on Pozzolan, Concrete and Geopolymer, Khon Kaen, Thailand, p. 105 – 118.

24. Palomo, A., Grutzeck, M.W., & Blanco, M.T. (1999). *Alkali-activated fly ashes: A cement for the future*. *Cem. Conc. Res.* 29(8):1323-9.
25. Hardjito, D., & B.V. Rangan. (2005). *Development and properties of low calcium fly ash based geopolymer (Research report GCI)*, Perth: Curtin University of Technology.
26. Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., & Rangan, B.V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. Technical paper No. 101-M52. *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute.
27. Global Health and Education Foundation (2007). Conventional Coagulation-Flocculation-Sedimentation. *Safe Drinking Water is Essential*. *National Academy of Sciences*. Retrieved on May20, 2011.
28. Callister, William.D.Jr. (2004). Application and processing of ceramics : powder processing. *Material Science and Engineering : An Introduction* (6th edition), Wiley, p : 442-443.
29. Christina, K.Yip., Grant, C., Lukey, J.L., Provis, J., & van Deventer, S.J. (2007). *Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation*. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Melbourne, Victoria 3010, Australia.
30. Hummel, F. A. (1984). Experimental methods of constructing phase diagram. *Introduction To Phase Equilibria In Ceramic System*. Taylor and Francis Inc, New York, p: 132.
31. Callister, William.D.Jr. (2004). Structures and properties of ceramics. *Material Science and Engineering : An Introduction* (6th edition), Wiley ,p : 384-424.
32. Sundaresan, S., & Aksay, I.A. (1991). Mullitization of diphasic aluminosilicate gels. *Journal. American Ceramic Society*. 74, 2388–2392.
33. She. J., Mechnich, P., Schmucker, M., & Schneider, H. (2001). *Low-Temperature Reaction-Sintering of Mullite Ceramics with an Y₂O₃ Addition*. *Journal. Ceramics International*. 27, 847-852.

34. Duxson, P., & Provis, J.L. (2008). *Designing precursors for geopolymer cements*. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, The University of Melbourne, Victoria 3010, Australia
35. Hos, J.P. (2000). *Synthetic aluminosilicates for geopolymer precursors*. The University of Western Australia, Australia.
36. Silva, P.D., Sagoe-Crenstil, K. (2000). The role of Al_2O_3 , SiO_2 and Na_2O on the amorphous to crystalline phase transformation in geopolymer systems. *Journal of Australian Ceramic Society*, V 45 (1), 63-71.
37. S. K. Lee., & Stebbins, J. F. (2006). Disorder and the extent of polymerization in calcium silicate and aluminosilicate glasses: O-17 NMR results and quantum chemical molecular orbital calculations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70 (16) 4275–86.
38. Oelkers, E.H., Schott, J., Devidal, J.L. (1994). The effect of aluminum, pH, and chemical affinity on the rates of aluminosilicate dissolution reactions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58 (9) 2011–24.
39. Lee, W.K.W., & van Deventer, J.S.J. (2000) *The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements*. Department of Chemical Engineering, University of Melbourne, Parkville, Melbourne, Victoria 3010, Australia.
40. Sembiring, F. P. (2010). *The influence of curing temperature and curing time to compressive strength of kaolin based geopolymer*. Department of Metallurgy and Materials Engineering, University of Indonesia, Depok, Indonesia.
41. Ferdi. (2010). *The influence of curing temperature and curing time to compressive strength of fly ash based geopolymer*. Department of Metallurgy and Materials Engineering, University of Indonesia, Depok, Indonesia.

Lampiran 1. Hasil XRD sampel Al_2O_3 99,7% (ALCOA)

(lanjutan)

*** Basic Data Process ***

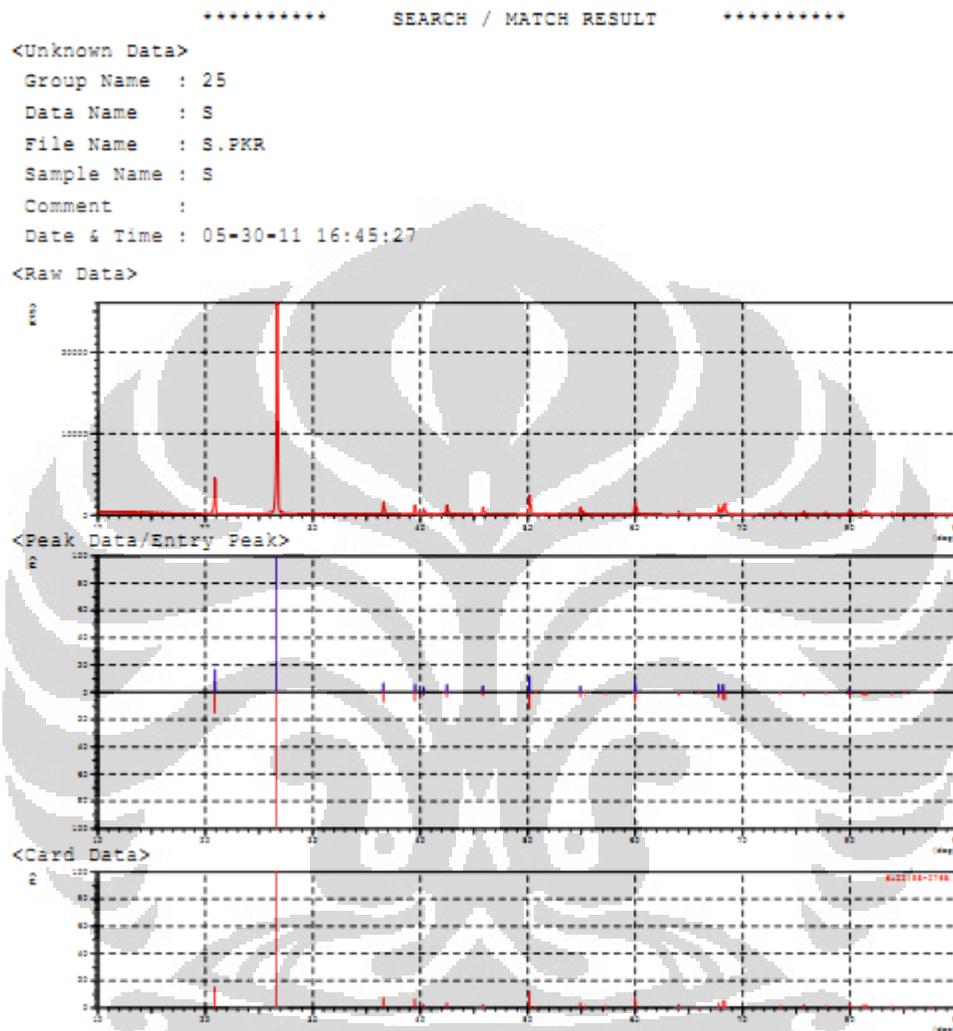
Group : 25
Data : A

Strongest 3 peaks

no. peak	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	5	43.4279	2.08204	100	0.18750	1361
2	3	35.2235	2.54590	89	0.18750	1218
3	7	57.5735	1.59962	87	0.19500	1179

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	25.6453	3.47085	58	0.18640	789	8788
2	32.9077	2.71957	2	0.32050	30	598
3	35.2235	2.54590	89	0.18750	1218	13324
4	37.8476	2.37519	38	0.18800	523	5733
5	43.4279	2.08204	100	0.18750	1361	14913
6	52.6237	1.73782	45	0.19170	607	6820
7	57.5735	1.59962	87	0.19500	1179	13565
8	59.8170	1.54488	3	0.26600	38	615
9	61.3290	1.51036	7	0.31530	92	1499
10	66.5925	1.40318	33	0.21270	450	5644
11	67.2200	1.39160	3	0.28000	43	1185
12	67.6200	1.38433	2	0.00000	33	0
13	68.2799	1.37255	50	0.19900	681	7948
14	76.9567	1.23799	14	0.21610	192	2322
15	77.3154	1.23314	7	0.23080	101	1248
16	80.7650	1.18894	5	0.22600	71	1043
17	84.4446	1.14626	3	0.24420	47	747
18	86.4562	1.12468	4	0.31750	49	935
19	89.0640	1.09838	6	0.22530	82	964

Lampiran 2. Hasil XRD sampel SiO₂ 99,5%

(lanjutan)

*** Basic Data Process ***

Group : 25
Data : 8

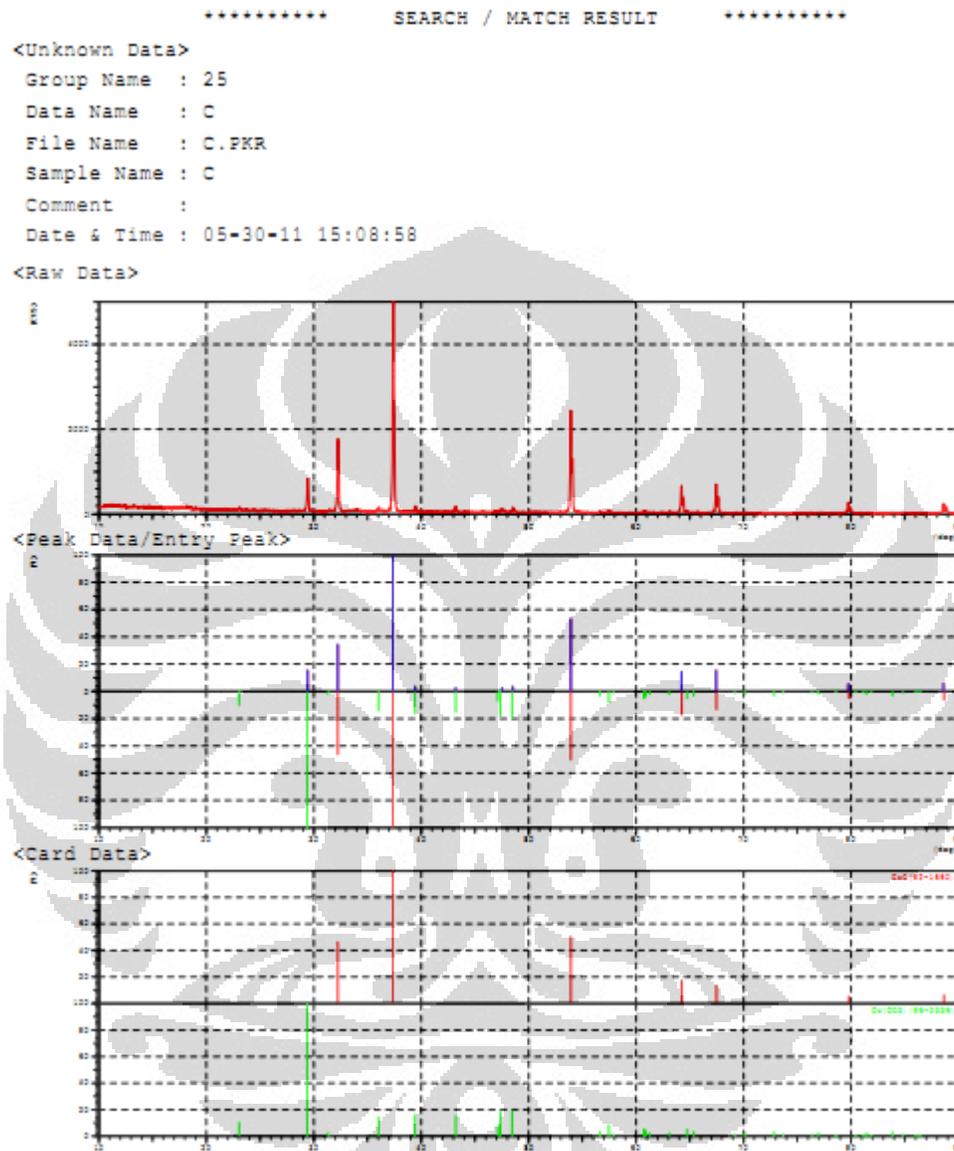
Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	2	26.6740	3.33928	100	0.11210	12189	81909
2	1	20.8898	4.24900	16	0.11110	1910	13352
3	8	50.1763	1.81669	11	0.11100	1300	8422

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	20.8898	4.24900	16	0.11110	1910	13352
2	26.6740	3.33928	100	0.11210	12189	81909
3	36.5834	2.45432	6	0.12200	708	4978
4	39.4988	2.27962	5	0.10850	591	3786
5	40.3290	2.23459	3	0.11090	360	2405
6	42.4831	2.12614	5	0.11270	571	3750
7	45.8362	1.97810	4	0.10870	449	2811
8	50.1763	1.81669	11	0.11100	1300	8422
9	54.9125	1.67067	4	0.11580	497	3225
10	59.9967	1.54068	7	0.12210	858	6066
11	67.7849	1.38137	5	0.12380	592	4270
12	68.1885	1.37417	5	0.13710	630	7106
13	79.9269	1.19929	2	0.13140	260	2352

Lampiran 3. Hasil XRD sampel CaO 99,5%



(lanjutan)

*** Basic Data Process ***

Group : 25
Data : C

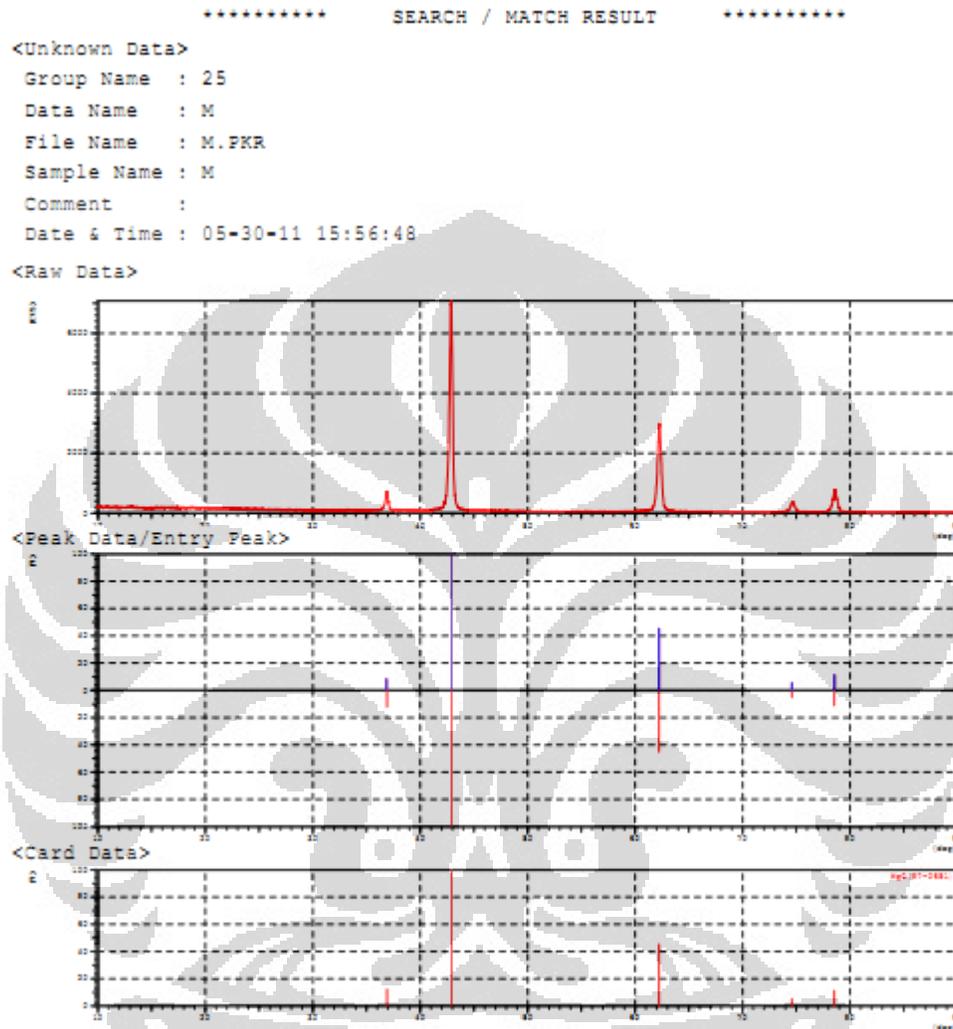
Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	3	37.4015	2.40249	100	0.12130	2365	16531
2	8	53.9177	1.69913	53	0.12330	1258	8953
3	2	32.2436	2.77405	34	0.13170	794	6059

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	29.4216	3.03339	15	0.13400	358	2643
2	32.2436	2.77405	34	0.13170	794	6059
3	37.4015	2.40249	100	0.12130	2365	16531
4	39.4341	2.28321	3	0.13170	65	521
5	43.1971	2.09263	2	0.11230	57	430
6	47.5100	1.91224	2	0.14880	47	552
7	48.5307	1.87438	3	0.12940	61	500
8	53.9177	1.69913	53	0.12330	1258	8953
9	64.2213	1.44914	14	0.12850	341	2597
10	67.4434	1.38753	15	0.13190	349	2614
11	79.7475	1.20153	5	0.14340	129	1127
12	88.6128	1.10280	5	0.14400	122	1033

Lampiran 4. Hasil XRD sampel MgO 99,5%



(lanjutan)

*** Basic Data Process ***

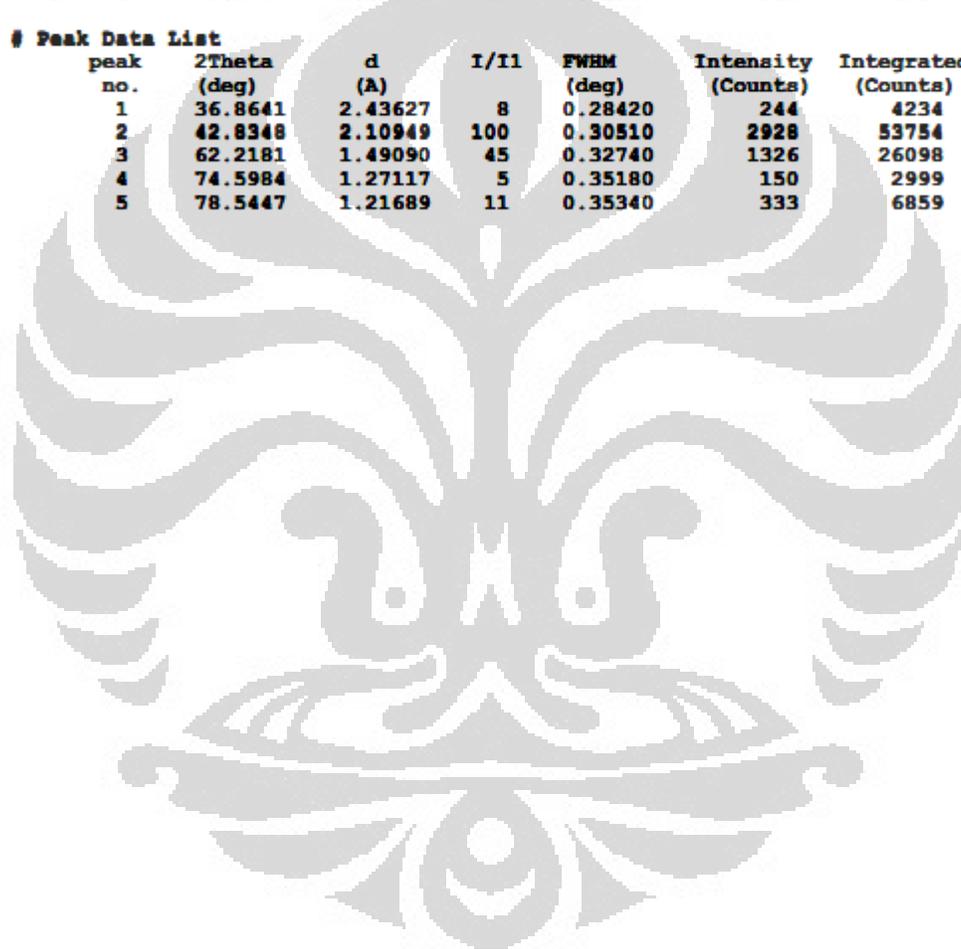
Group : 25
Data : M

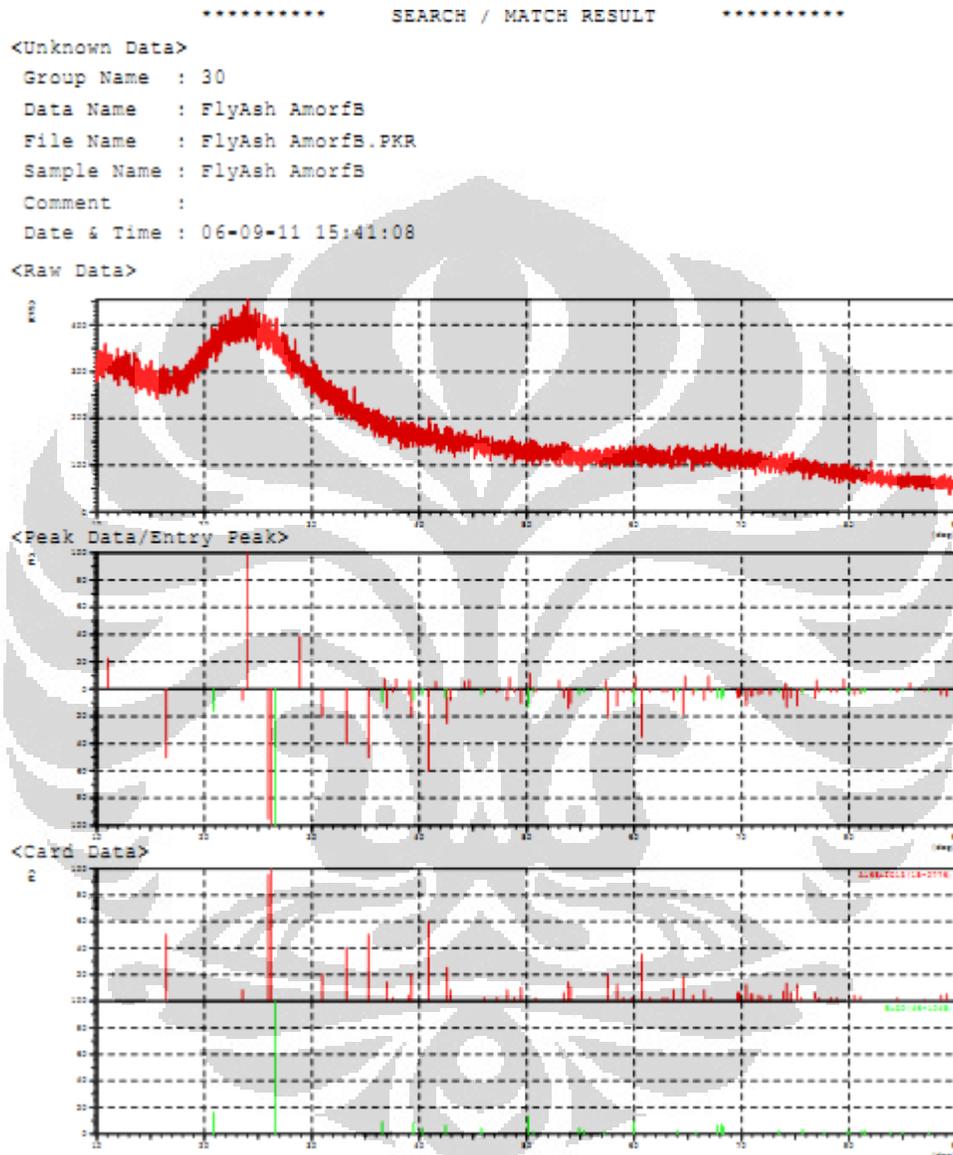
Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	2	42.8348	2.10949	100	0.30510	2928	53754
2	3	62.2181	1.49090	45	0.32740	1326	26098
3	5	78.5447	1.21689	11	0.35340	333	6859

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	36.8641	2.43627	8	0.28420	244	4234
2	42.8348	2.10949	100	0.30510	2928	53754
3	62.2181	1.49090	45	0.32740	1326	26098
4	74.5984	1.27117	5	0.35180	150	2999
5	78.5447	1.21689	11	0.35340	333	6859



Lampiran 5. Hasil XRD sampel prekursor abu terbang *class F melt-quench glassy*

(lanjutan)

*** Basic Data Process ***

Group : 30
Data : FlyAsh AmorfiB

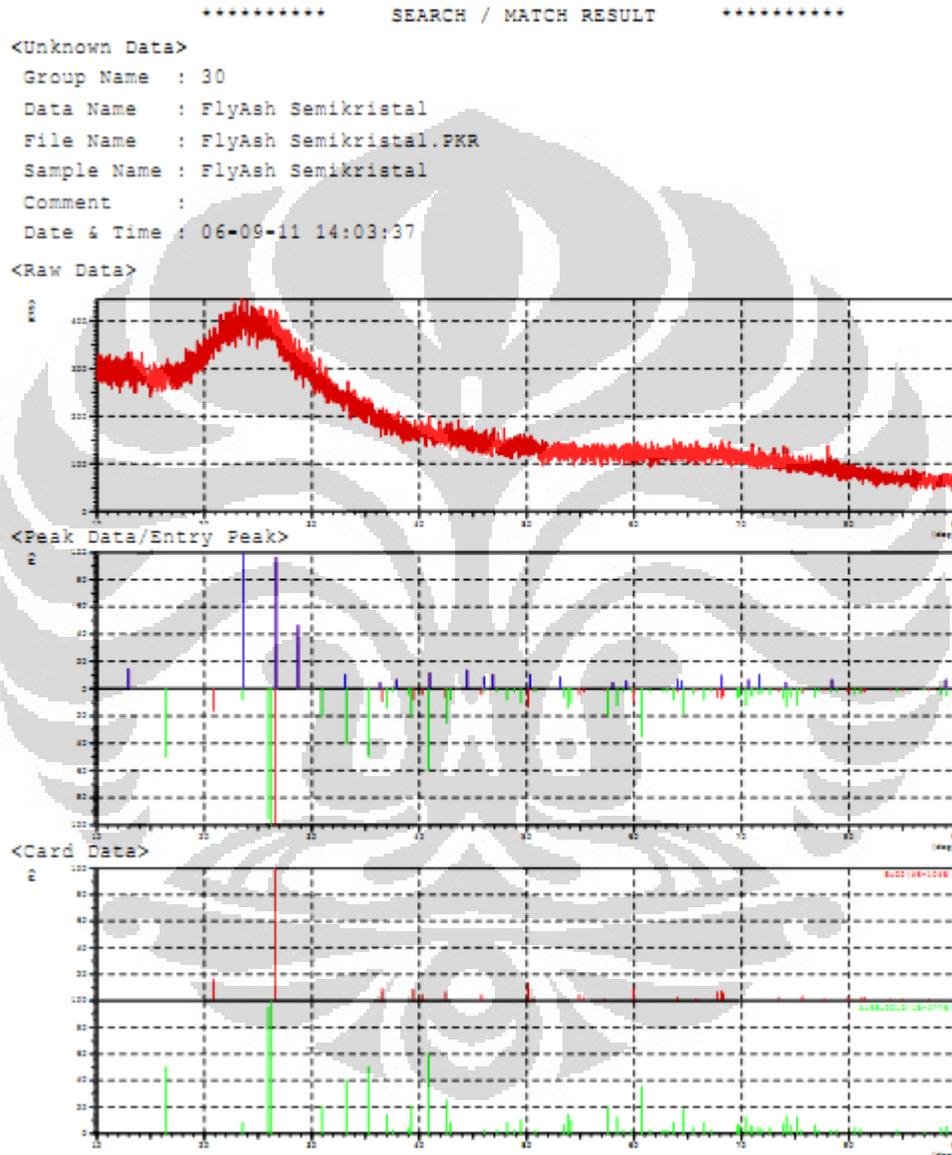
Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	2	24.0516	3.69711	100	7.08330	85	27077
2	3	28.8800	3.08903	38	2.76000	32	5276
3	1	11.0450	8.00423	22	1.47000	19	1823

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	11.0450	8.00423	22	1.47000	19	1823
2	24.0516	3.69711	100	7.08330	85	27077
3	28.8800	3.08903	38	2.76000	32	5276
4	36.7750	2.44197	7	0.11000	6	63
5	37.8400	2.37565	7	0.12000	6	89
6	39.1100	2.30138	6	0.10000	5	72
7	41.5400	2.17220	5	0.08000	4	21
8	44.2200	2.04657	5	0.12000	4	88
9	44.6566	2.02757	6	0.07330	5	43
10	48.4000	1.87913	8	0.20000	7	185
11	50.2900	1.81285	11	0.26000	9	255
12	53.0100	1.72606	6	0.06000	5	59
13	57.3600	1.60507	6	0.20000	5	129
14	60.1200	1.53781	9	0.44000	8	270
15	64.7600	1.43838	9	0.52000	8	406
16	66.9100	1.39729	9	0.30000	8	293
17	74.1050	1.27841	4	0.03000	3	19
18	76.9900	1.23754	6	0.18000	5	86
19	79.5100	1.20452	7	0.22000	6	126
20	85.6800	1.13287	4	0.04000	3	21

Lampiran 6. Hasil XRD sampel prekursor abu terbang *class F melt-quench*
semikristalin



(lanjutan)

```

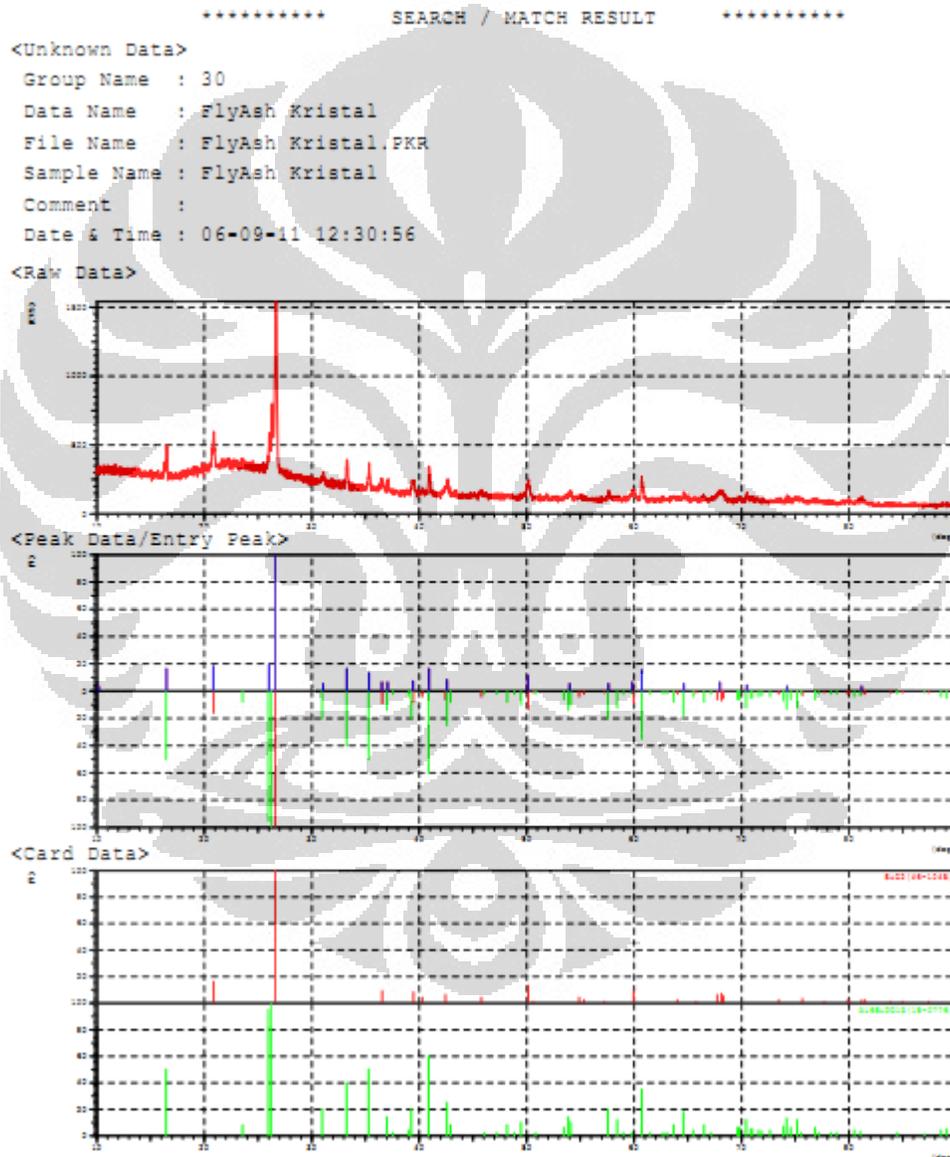
*** Basic Data Process ***

Group   : 30
Data    : FlyAsh Semikristal

# Strongest 3 peaks
no. peak  2Theta      d      I/I1  FWHM  Intensity  Integrated Int
   no.    (deg)      (A)    (deg) (deg)  (Counts)  (Counts)
  1  2     23.6600    3.75740 100   6.00000    80    19408
  2  3     26.6800    3.33855  96   2.93340    77     6313
  3  4     28.7200    3.10588  46   2.80000    37     5162

# Peak Data List
peak      2Theta      d      I/I1  FWHM  Intensity  Integrated Int
no.       (deg)      (A)    (deg) (deg)  (Counts)  (Counts)
  1     12.9300    6.84126  14   0.42000    11     287
  2     23.6600    3.75740 100   6.00000    80    19408
  3     26.6800    3.33855  96   2.93340    77     6313
  4     28.7200    3.10588  46   2.80000    37     5162
  5     33.1000    2.70421  10   0.24000     8     241
  6     36.3450    2.46987   4   0.05000     3     18
  7     37.8850    2.37293   6   0.05000     5     34
  8     40.9750    2.20084  11   0.41000     9     381
  9     44.4500    2.03651  13   0.50000    10     535
 10     46.0600    1.96900   8   0.52000     6     171
 11     46.8433    1.93789  10   0.51330     8     241
 12     50.3266    1.81162  10   1.05330     8     585
 13     53.1350    1.72230   8   0.55000     6     322
 14     58.0200    1.58837   4   0.08000     3     32
 15     59.2600    1.55806   5   0.12000     4     49
 16     64.0400    1.45281   6   0.16000     5     60
 17     64.4300    1.44495   5   0.22000     4     68
 18     68.1500    1.37485   9   0.38000     7     283
 19     70.6600    1.33204   6   0.22000     5     112
 20     71.6500    1.31605  10   0.30000     8     207
 21     74.1250    1.27811   4   0.07000     3     22
 22     78.4100    1.21864   6   0.10000     5     93
 23     89.0400    1.09861   6   0.36000     5     126

```

Lampiran 7. Hasil XRD sampel prekursor abu terbang *class F melt-quench* kristalin

(lanjutan)

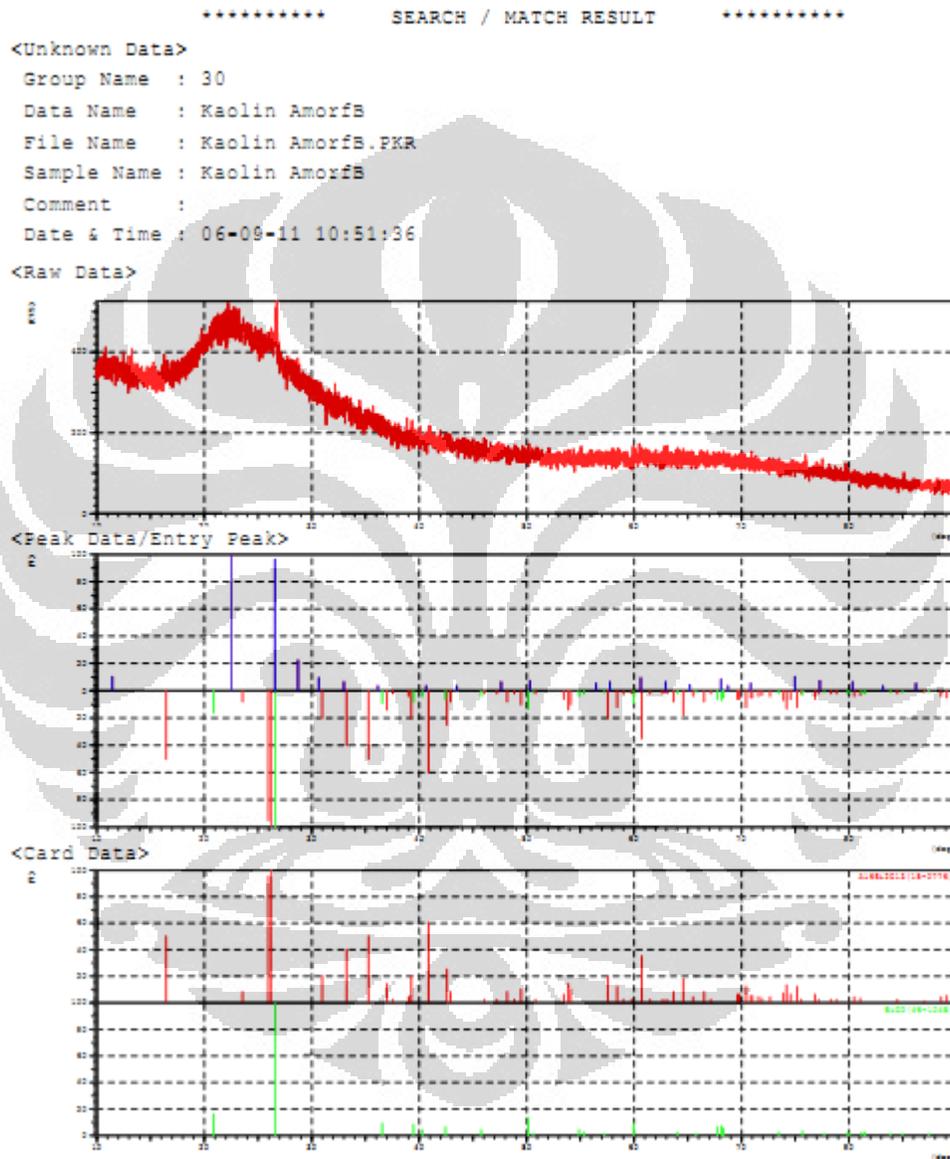
```

*** Basic Data Process ***
Group      : 30
Data       : FlyAsh Kristal

# Strongest 3 peaks
no. peak   2Theta      d      I/I1    FWHM      Intensity  Integrated Int
   no.      (deg)      (A)      I/I1    (deg)      (Counts)  (Counts)
  1     5     26.6433    3.34306  100    0.22170    1000    13949
  2     4     26.0400    3.41913   19    0.17460     189     3357
  3     3     20.8461    4.25780   18    0.24420     181     2775

# Peak Data List
peak       2Theta      d      I/I1    FWHM      Intensity  Integrated Int
  no.      (deg)      (A)      I/I1    (deg)      (Counts)  (Counts)
  1     10.1633    8.69656    3    0.22670     32     618
  2     16.4882    5.37204   16    0.18490    157    1726
  3     20.8461    4.25780   18    0.24420    181    2775
  4     26.0400    3.41913   19    0.17460    189    3357
  5     26.6433    3.34306  100    0.22170   1000   13949
  6     31.0623    2.87681    5    0.20460     50     680
  7     33.2633    2.69131   16    0.17790    159    1629
  8     35.3192    2.53922   13    0.19620    126    1294
  9     36.5240    2.45817    6    0.24000     59     787
 10     37.0646    2.42355    6    0.14780     63     499
 11     39.4123    2.28443    7    0.34770     71    1606
 12     40.9182    2.20376   16    0.17640    164    1584
 13     42.5831    2.12137    8    0.28620     84    1573
 14     50.1109    1.81891   11    0.30180    106    2166
 15     53.9960    1.69685    5    0.27200     48    1040
 16     57.6222    1.59839    5    0.18450     53     598
 17     59.8379    1.54439    6    0.48920     61    1669
 18     60.7091    1.52429   15    0.18010    148    1542
 19     64.6214    1.44113    5    0.18570     54     646
 20     67.9966    1.37758    6    0.68670     55    2626
 21     70.5023    1.33463    4    0.18190     42     549
 22     74.2366    1.27647    3    0.17330     33     391
 23     81.1750    1.18397    3    0.32340     34     766

```

Lampiran 8. Hasil XRD sampel prekursor metakaolin *melt-quench glassy*

(lanjutan)

*** Basic Data Process ***

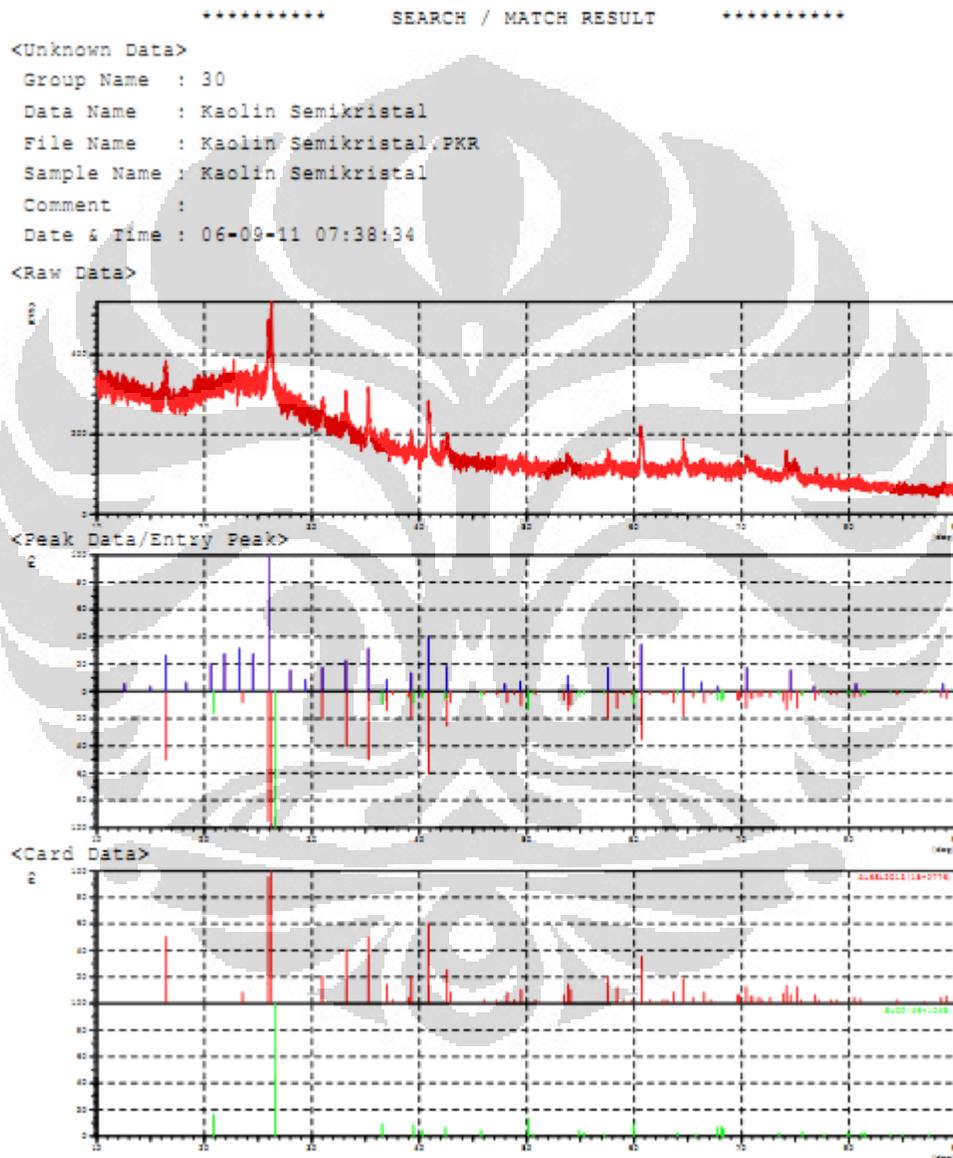
Group : 30
Data : Kaolin AmorfB

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	2	22.4600	3.95537	100	5.60000	97	26677
2	3	26.5800	3.35088	96	0.94000	93	4858
3	4	28.7200	3.10588	22	1.44000	21	3020

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	11.4250	7.73884	10	0.49000	10	594
2	22.4600	3.95537	100	5.60000	97	26677
3	26.5800	3.35088	96	0.94000	93	4858
4	28.7200	3.10588	22	1.44000	21	3020
5	30.6600	2.91363	9	0.28000	9	301
6	33.0000	2.71218	6	0.12000	6	105
7	36.1600	2.48208	3	0.00000	3	0
8	40.6400	2.21820	3	0.02000	3	4
9	43.5000	2.07876	3	0.04000	3	19
10	47.6300	1.90770	6	0.38000	6	286
11	50.2900	1.81285	7	0.18000	7	176
12	56.4700	1.62823	5	0.14000	5	62
13	57.7550	1.59503	6	0.21000	6	101
14	60.6150	1.52643	9	0.43000	9	257
15	62.9300	1.47573	6	0.14000	6	68
16	65.1750	1.43022	4	0.21000	4	80
17	68.1000	1.37574	8	0.40000	8	271
18	68.7400	1.36449	3	0.04000	3	20
19	70.8600	1.32877	5	0.12000	5	69
20	74.9833	1.26560	10	0.43330	10	530
21	77.2800	1.23361	7	0.28000	7	303
22	80.3300	1.19428	6	0.18000	6	135
23	83.1600	1.16068	3	0.08000	3	40
24	86.2400	1.12695	5	0.28000	5	128

Lampiran 9. Hasil XRD sampel prekursor metakaolin *melt-quench* semikristalin

(lanjutan)

```

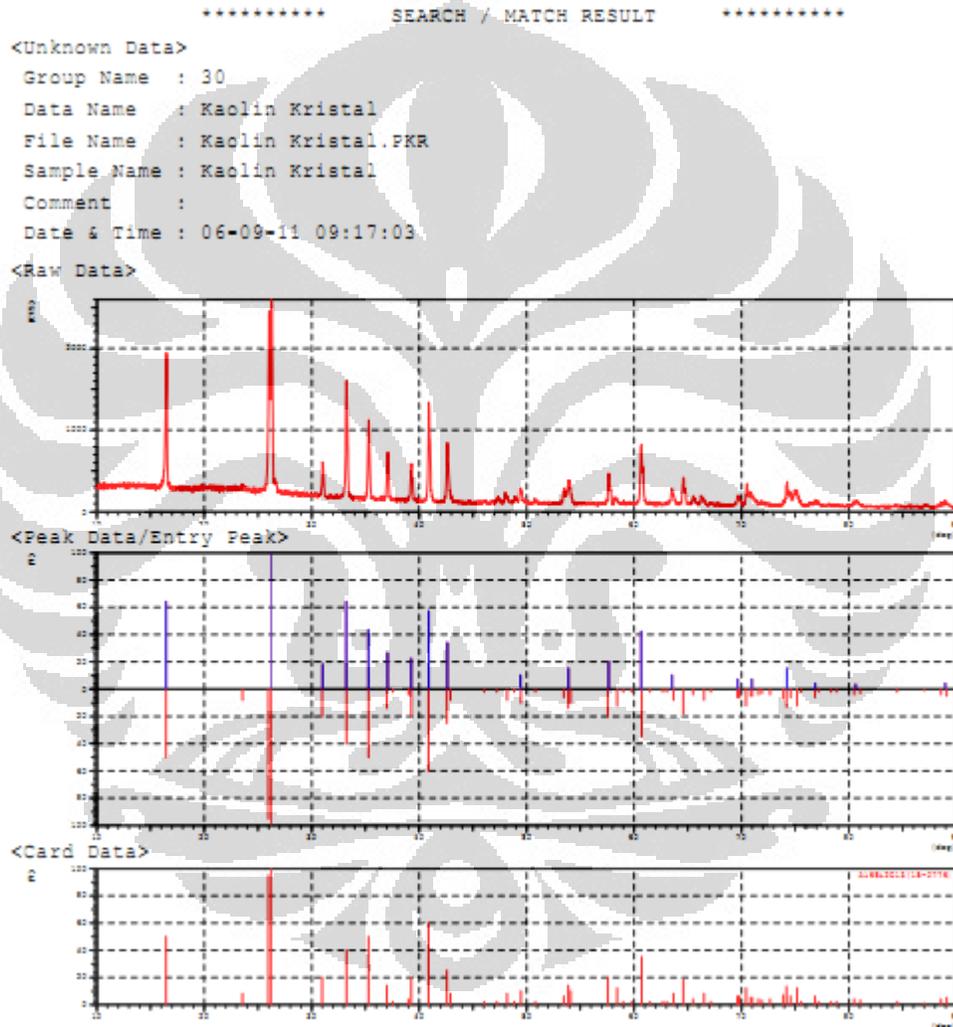
*** Basic Data Process ***

Group      : 30
Data       : Kaolin Semikristal

# Strongest 3 peaks
no. peak   2Theta      d      I/I1    FWHM      Intensity  Integrated Int
no.        (deg)         (A)                    (deg)      (Counts)   (Counts)
  1         9      26.1220    3.40858  100    0.69200     157     8042
  2        17      40.8566    2.20694   40    0.56670     63     1757
  3        23      60.6575    1.52546   34    0.54500     53     1577

# Peak Data List
peak       2Theta      d      I/I1    FWHM      Intensity  Integrated Int
no.        (deg)         (A)                    (deg)      (Counts)   (Counts)
  1        12.5800    7.03080    5    0.36000     8      234
  2        14.9800    5.90933    3    0.12000     5       62
  3        16.4150    5.39583   26    0.51000    41    1084
  4        18.3100    4.84143    6    0.30000     9     303
  5        20.6200    4.30398   20    2.40000    31    3853
  6        21.8600    4.06256   27    0.00000    42     0
  7        23.2800    3.81787   31    0.00000    48     0
  8        24.5400    3.62462   27    0.00000    42     0
  9        26.1220    3.40858  100    0.69200   157    8042
 10        28.0200    3.18186   15    1.08000    23    2092
 11        29.4100    3.03456    8    0.18000    13    259
 12        30.9933    2.88305   17    0.57330    26    858
 13        33.1800    2.69787   22    0.56000    35    981
 14        35.2558    2.54364   31    0.57830    49   1404
 15        36.9700    2.42954    8    0.52660    13    482
 16        39.2500    2.29350   13    0.50000    20    548
 17        40.8566    2.20694   40    0.56670    63   1757
 18        42.5633    2.12231   18    0.59330    29    940
 19        47.9550    1.89553    5    0.45000     8    277
 20        49.4050    1.84323    7    0.51000    11    290
 21        53.8400    1.70140   11    0.56000    18    750
 22        57.5800    1.59946   17    0.50000    26    919
 23        60.6575    1.52546   34    0.54500    53   1577
 24        64.5950    1.44166   17    0.59000    27   1166
 25        66.2800    1.40903    6    0.56000    10    370
 26        67.7850    1.38137    3    0.17000     5     63
 27        70.4950    1.33476   17    0.71000    27   1459
 28        74.5650    1.27166   15    1.35000    24   1541
 29        76.7200    1.24122    3    0.08000     5     57
 30        80.6400    1.19047    5    0.48000     8    328
 31        88.7450    1.10150    5    0.43000     8    293

```

Lampiran 10. Hasil XRD sampel prekursor metakaolin *melt-quench* kristalin

(lanjutan)

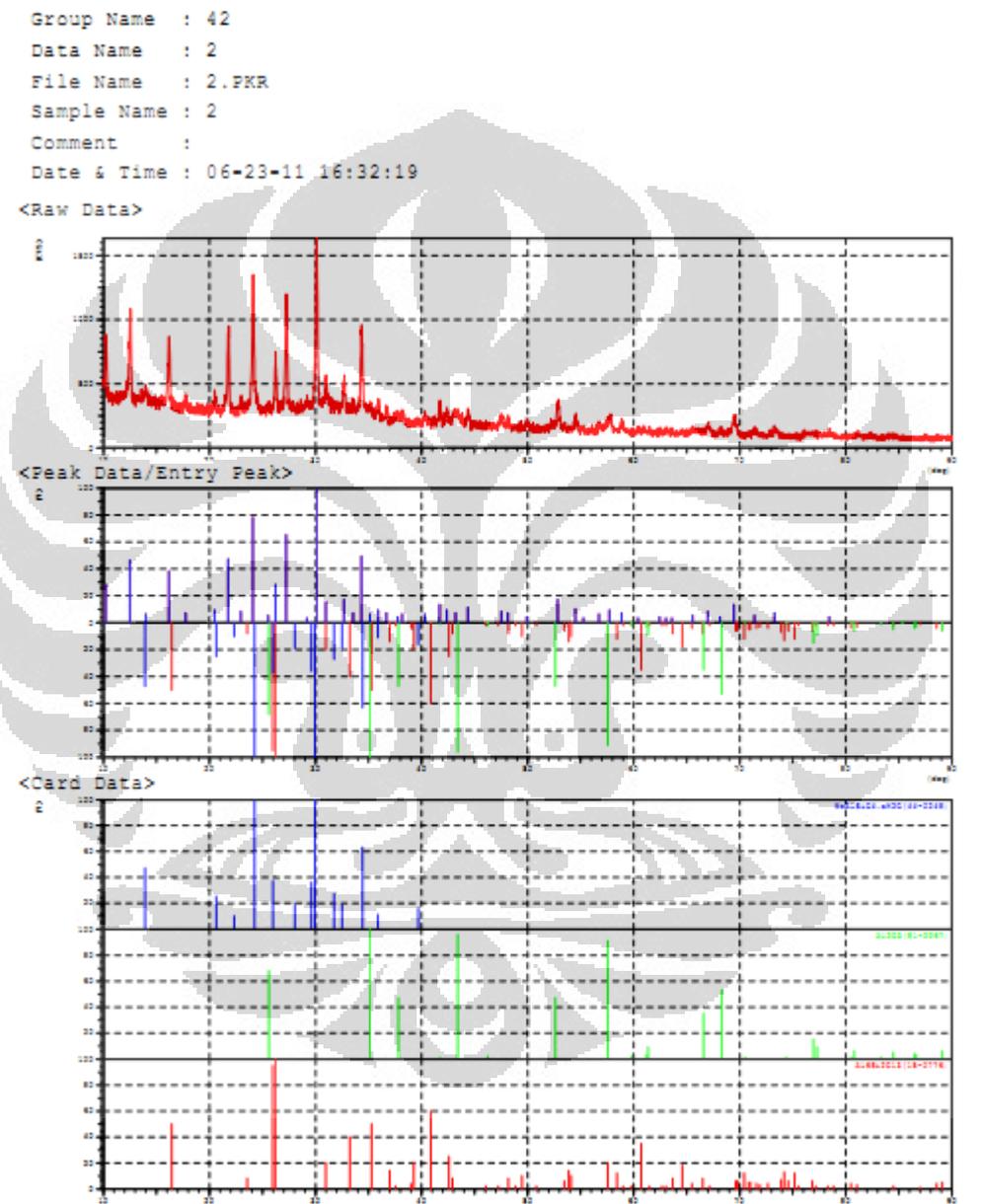
```

*** Basic Data Process ***
Group      : 30
Data       : Kaolin Kristal

# Strongest 3 peaks
no. peak   2Theta      d      I/I1     FWHM      Intensity   Integrated Int
   no.      (deg)         (A)          (deg)    (Counts)   (Counts)
  1  2      26.1424     3.40597    100    0.46980    1456     35398
  2  1      16.4516     5.38390     64    0.24630     934     12644
  3  4      33.2258     2.69426     64    0.23850     934     11510

# Peak Data List
peak       2Theta      d      I/I1     FWHM      Intensity   Integrated Int
  no.      (deg)         (A)          (deg)    (Counts)   (Counts)
  1      16.4516     5.38390     64    0.24630     934     12644
  2      26.1424     3.40597    100    0.46980    1456     35398
  3      31.0114     2.88141     18    0.23250     263     3085
  4      33.2258     2.69426     64    0.23850     934     11510
  5      35.2886     2.54135     43    0.23880     629     7680
  6      37.0575     2.42400     26    0.23190     385     4598
  7      39.2612     2.29287     22    0.24070     318     3941
  8      40.9010     2.20465     57    0.24410     833    10413
  9      42.6189     2.11967     34    0.25590     494     7207
 10      49.4240     1.84257     10    0.26400     145     2669
 11      53.9116     1.69930     15    0.33670     225     5820
 12      57.6393     1.59795     20    0.23960     284     3841
 13      60.6690     1.52520     42    0.24930     606     7869
 14      63.5322     1.46319     10    0.26220     149     2228
 15      69.6637     1.34864     7     0.25840     109     1637
 16      70.9600     1.32715     7     0.17340     109     4068
 17      74.2281     1.27659     15    0.27410     224     5526
 18      76.8666     1.23922     4     0.33330     51     1426
 19      80.6160     1.19076     3     0.63200     49     1951
 20      88.9640     1.09935     4     0.28800     57     1378

```

Lampiran 11. Hasil XRD sampel geopolimer dari prekursor metakaolin *glassy*

(lanjutan)

```

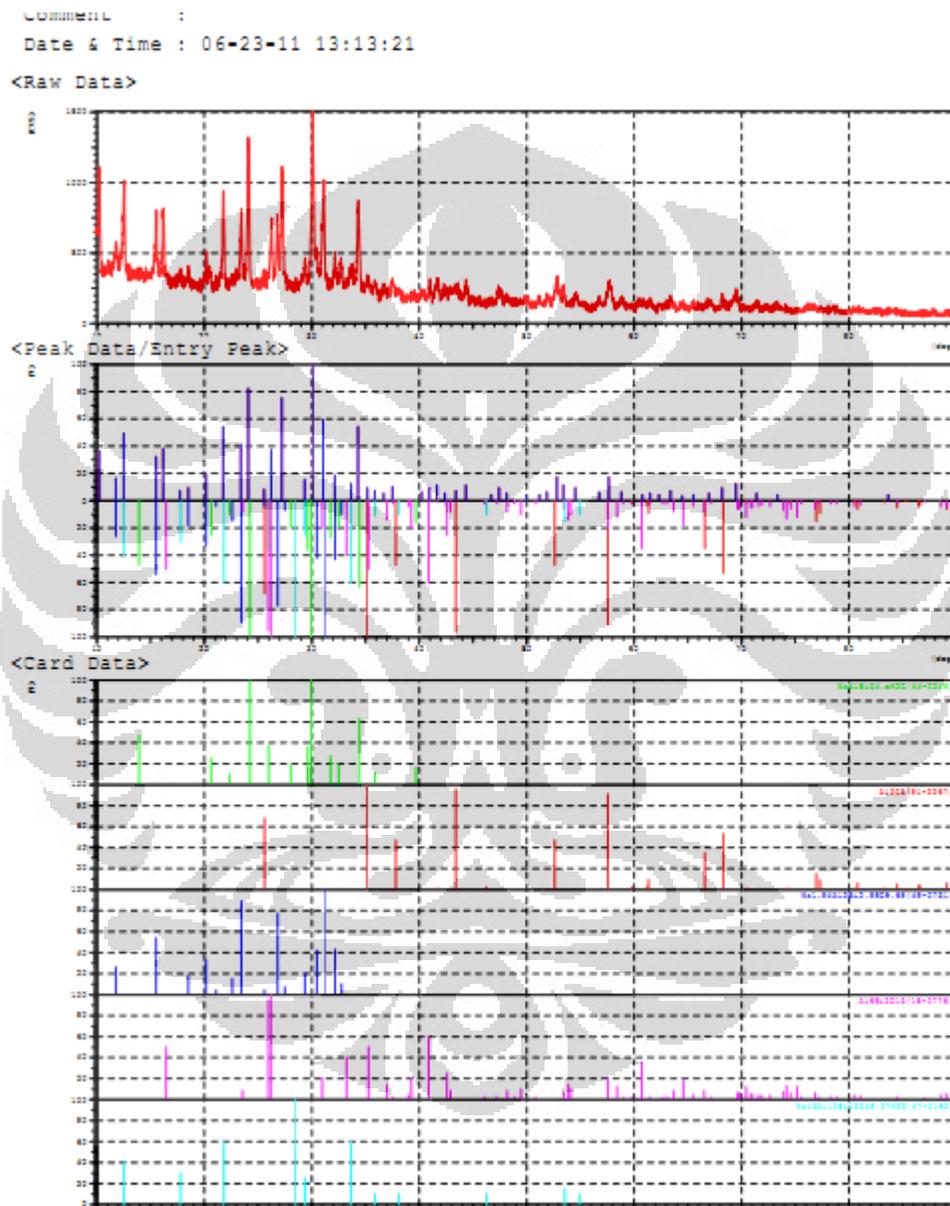
*** Basic Data Process ***
Group      : 42
Data       : 2

# Strongest 3 peaks
no. peak   2Theta      d      I/I1    FWHM      Intensity    Integrated Int
              (deg)      (A)      (deg)      (Counts)      (Counts)
  1  14      30.0725    2.96920    100    0.18880     538     5700
  2   9      24.0981    3.69008     78    0.18900     420     5189
  3  12      27.2343    3.27184     65    0.19550     349     3934

# Peak Data List
peak no.   2Theta      d      I/I1    FWHM      Intensity    Integrated Int
              (deg)      (A)      (deg)      (Counts)      (Counts)
  1  10.2215    8.64717    28    0.17250     148     1363
  2  12.5126    7.06852    46    0.20170     249     3064
  3  13.9920    6.32430     6    0.22400      32      486
  4  16.1701    5.47699    38    0.20300     203     2417
  5  17.7450    4.99429     7    0.23000      40      561
  6  20.4839    4.33018     9    0.16330      48      478
  7  21.7635    4.08035    47    0.18590     252     2860
  8  22.9883    3.87083     8    0.19000      48      848
  9  24.0981    3.69008    78    0.18900     420     5189
 10  25.5491    3.48370     5    0.22830      25      387
 11  26.2209    3.39595    28    0.18700     149     1632
 12  27.2343    3.27184    65    0.19550     349     3934
 13  29.1914    3.05679     3    0.21710      17      286
 14  30.0725    2.96920   100    0.18880     538     5700
 15  30.9683    2.88832    18    0.17470      82      887
 16  32.6778    2.73818    17    0.19560      90      963
 17  33.8411    2.60988     7    0.13860      37      309
 18  34.3228    2.61062    49    0.19900     265     2999
 19  35.1381    2.55189     6    0.23040      30      527
 20  35.9140    2.49851     9    0.16400      50      475
 21  36.6875    2.44759     7    0.19500      38      435
 22  37.7450    2.38141     4    0.28340      21      480
 23  38.1766    2.35548     6    0.14670      34      312
 24  40.3083    2.23880     6    0.21270      34      484
 25  41.6958    2.16444    13    0.17830      71      740
 26  42.3848    2.13088     9    0.18440      51      480
 27  43.1966    2.09266     7    0.60670      35     1470
 28  44.3494    2.04090    11    0.19220      57      678
 29  47.5233    1.91173     8    0.19330      42      501
 30  48.1340    1.88889     7    0.14800      38      296
 31  49.9305    1.82506     4    0.16760      24      261
 32  52.8366    1.73132    17    0.28670      91     1717
 33  54.8131    1.68197    10    0.21960      58      687
 34  55.2550    1.66113     3    0.13000      17      208
 35  56.7280    1.62144     6    0.18400      34      387
 36  57.7025    1.59635     9    0.38910      47     1053
 37  58.8700    1.56745     7    0.18000      39      385
 38  60.4320    1.53062     3    0.13600      17      174
 39  62.4475    1.48597     4    0.17500      21      243
 40  63.0433    1.47335     3    0.20670      17      208
 41  63.6060    1.46167     3    0.17200      16      190
 42  65.8880    1.42288     5    0.17000      28      347
 43  66.9919    1.39578     8    0.21040      45      679
 44  68.1333    1.37515     4    0.18670      19      238
 45  69.4610    1.35207    13    0.24200      70     1164
 46  71.3962    1.32010     5    0.19250      29      440
 47  73.2850    1.29067     7    0.19000      37      568
 48  78.4391    1.21826     4    0.18830      20      233

```

Lampiran 12. Hasil XRD sampel geopolimer dari prekursor metakaolin semikristalin



(lanjutan)

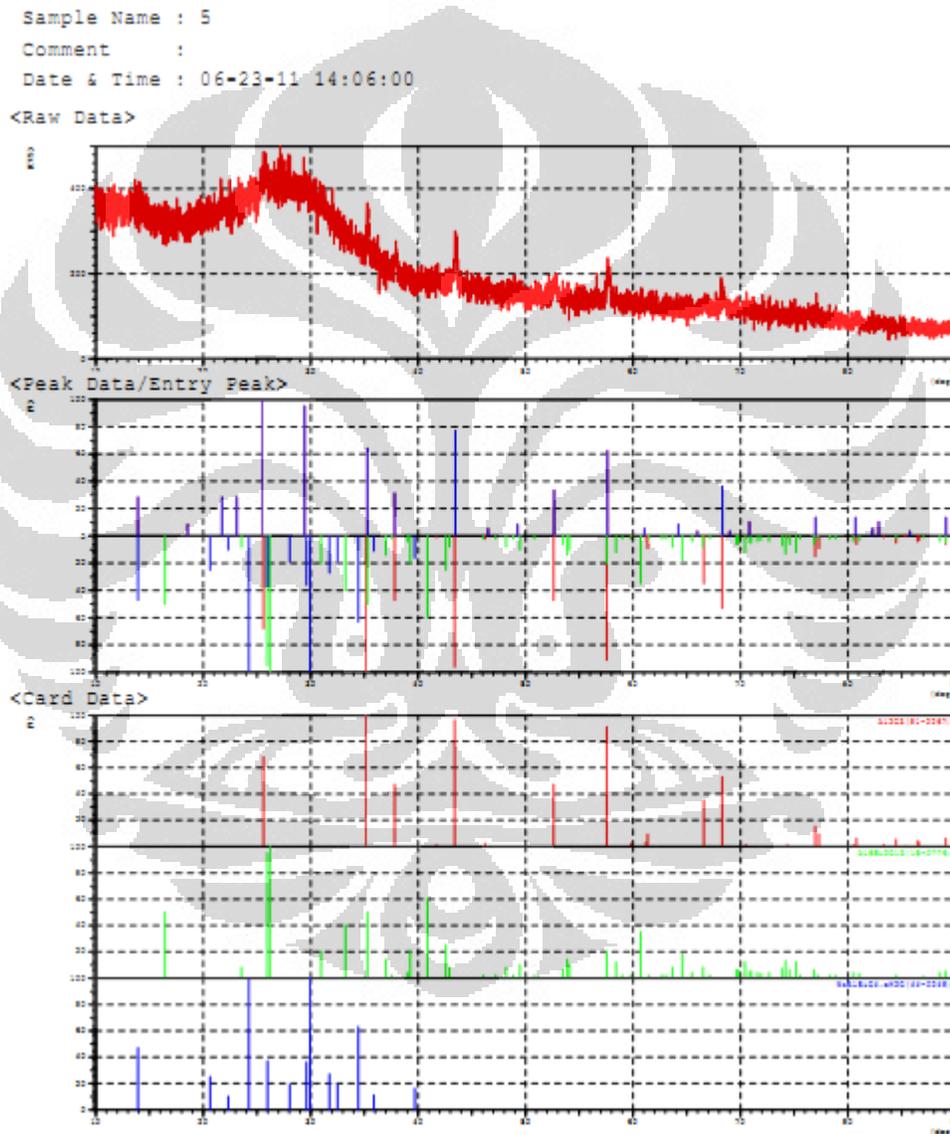
no. peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	16	30.0575	2.97065	100	0.23120	456
2	11	34.0832	3.69233	82	0.20910	373
3	14	27.2151	3.27411	75	0.22810	343

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	10.2091	8.65764	36	0.17820	164	1525
2	11.7728	7.51099	16	0.25430	74	1268
3	12.5052	7.07268	49	0.21050	225	2778
4	15.4982	5.71289	32	0.21640	146	1998
5	16.1663	5.47827	38	0.20870	173	2148
6	17.7325	4.99778	7	0.20500	34	397
7	18.5085	4.78995	9	0.23300	40	547
8	20.1584	4.40148	19	0.18970	87	1592
9	21.7531	4.08228	54	0.20280	247	3088
10	23.4063	3.79755	41	0.20470	186	2564
11	24.0832	3.69233	82	0.20910	373	4431
12	25.5700	3.48090	8	0.19340	37	453
13	26.2186	3.39624	37	0.21990	168	2976
14	27.2151	3.27411	75	0.22810	343	5504
15	29.3456	3.04107	15	0.19530	69	1032
16	30.0575	2.97065	100	0.23120	456	6900
17	31.0571	2.87728	59	0.24680	268	3949
18	32.1361	2.78309	18	0.20370	80	1112
19	33.6700	2.65972	12	0.35000	56	1232
20	34.3078	2.61172	54	0.22700	248	3063
21	35.1685	2.54975	9	0.26290	43	590
22	36.6750	2.44840	5	0.25000	23	373
23	37.5085	2.39607	10	0.22890	48	688
24	40.2328	2.23971	6	0.37430	26	612
25	40.9484	2.20236	9	0.30420	40	557
26	41.6370	2.16736	11	0.34600	51	877
27	42.3810	2.13102	8	0.34200	23	360
28	43.4123	2.08276	7	0.43810	34	1025
29	44.3393	2.04134	11	0.21470	81	630
30	46.6883	1.94396	4	0.15670	16	187
31	47.4330	1.91816	9	0.40800	40	789
32	48.1370	1.88878	5	0.17400	24	302
33	49.9700	1.82371	4	0.42000	17	596
34	51.1800	1.78340	4	0.16000	20	212
35	51.8871	1.76074	6	0.17430	29	366
36	52.8045	1.73229	17	0.28910	77	1441
37	53.4177	1.71385	11	0.18670	51	540
38	54.5250	1.68163	9	0.19000	41	598
39	56.7425	1.62106	6	0.23500	26	502
40	57.6425	1.59787	17	0.39500	79	1727
41	58.8233	1.56858	6	0.32670	27	633
42	60.7480	1.52341	4	0.29600	20	562
43	61.4880	1.50684	5	0.17600	24	327
44	62.3175	1.48876	4	0.19500	16	235
45	63.3878	1.46617	7	0.18440	32	482
46	64.4613	1.44432	3	0.33070	15	336
47	65.5200	1.42353	4	0.18660	17	334
48	66.9733	1.39612	5	0.46670	25	779
49	68.1783	1.37435	9	0.19670	43	545
50	69.4735	1.35186	12	0.29700	54	1110
51	71.3833	1.32031	5	0.28670	23	430
52	73.3400	1.28984	4	0.20000	16	240

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
54	83.6383	1.15525	4	0.18330	18	307

Lampiran 13. Hasil XRD sampel geopolimer dari prekursor abu terbang *class F glassy*



(lanjutan)

Group : 42
Data : 5

Strongest 3 peaks

no. peak	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)	
1	5	25.5600	3.48224	100	0.62000	39	2460
2	6	29.4400	3.03154	95	3.84000	37	9233
3	9	43.4625	2.08047	77	0.60500	30	912

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	13.9300	6.35231	28	1.14000	11	1279
2	18.5500	4.77933	8	0.06000	3	21
3	21.7600	4.08100	28	0.42000	11	454
4	23.1200	3.84393	28	0.36000	11	631
5	25.5600	3.48224	100	0.62000	39	2460
6	29.4400	3.03154	95	3.84000	37	9233
7	35.2733	2.54242	64	0.57330	25	787
8	37.8200	2.37686	31	0.44000	12	294
9	43.4625	2.08047	77	0.60500	30	912
10	46.5200	1.95060	5	0.04000	2	10
11	49.2600	1.84832	8	0.04000	3	20
12	52.6600	1.73671	33	0.60000	13	460
13	57.6150	1.59857	62	0.59000	24	974
14	61.0650	1.51626	5	0.05000	2	9
15	64.2300	1.44897	8	0.06000	3	25
16	65.9800	1.41471	3	0.00000	1	0
17	68.3100	1.37202	36	0.50000	14	379
18	69.0000	1.35998	3	0.00000	1	0
19	70.8300	1.32926	10	0.18000	4	121
20	76.9900	1.23754	13	0.34000	5	186
21	80.7100	1.18961	13	0.22000	5	118
22	82.2600	1.17108	5	0.20000	2	51
23	82.8700	1.16400	10	0.14000	4	83
24	85.7600	1.13202	3	0.00000	1	0
25	89.1200	1.09783	13	0.40000	5	228

(lanjutan)

```

*** Basic Data Process ***
Group   : 42
Data    : 6

# Strongest 3 peaks
no. peak  2Theta      d      I/I1  FWHM  Intensity  Integrated Int
      no.  (deg)      (Å)      (deg)  (Counts)  (Counts)
  1     7   29.8666   2.98920  100   0.85330    63    5865
  2     6   27.0933   3.28855   78   0.81330    49    4854
  3     5   23.9800   3.70798   51   0.60000    32    1507

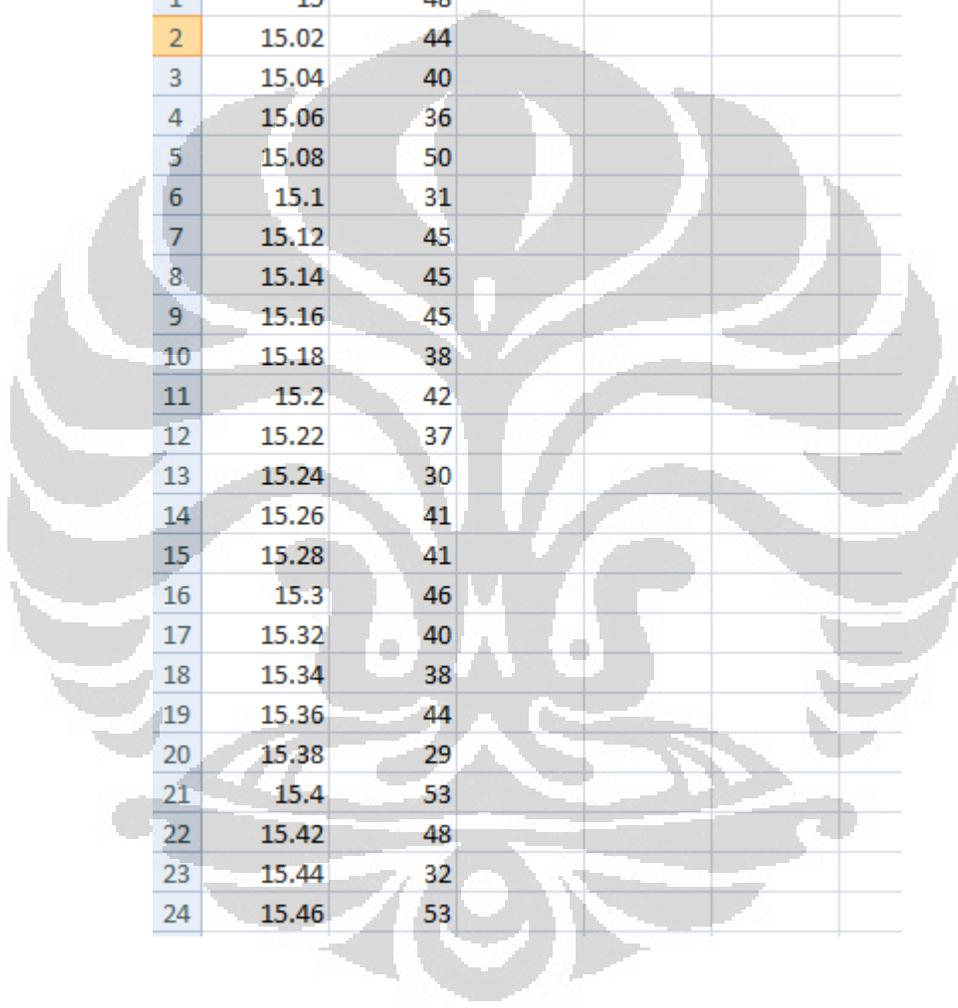
# Peak Data List
peak      2Theta      d      I/I1  FWHM  Intensity  Integrated Int
no.      (deg)      (Å)      (deg)  (deg)  (Counts)  (Counts)
  1     12.5066   7.07190   35   0.57330    22    1210
  2     16.1150   5.49559   27   0.51000    17     448
  3     18.5300   4.78444    6   0.06000     4     43
  4     21.6400   4.10336   32   0.60000    20     745
  5     23.9800   3.70798   51   0.60000    32    1507
  6     27.0933   3.28855   78   0.81330    49    4854
  7     29.8666   2.98920  100   0.85330    63    5865
  8     34.1700   2.62194   37   0.58000    23    1344
  9     38.0250   2.36452    8   0.11000     5     75
 10     43.3300   2.08652   24   0.58000    15     846
 11     47.2200   1.92330   11   0.28000     7     194
 12     49.9400   1.82473   11   0.28000     7     205
 13     52.5500   1.74008   19   0.46000    12     277
 14     54.7800   1.67440    5   0.04000     3     22
 15     57.5200   1.60098   27   0.56000    17     671
 16     60.6550   1.52552    5   0.03000     3     11
 17     64.1500   1.45058    5   0.22000     3    106
 18     65.4500   1.42488    6   0.22000     4     92
 19     66.5300   1.40434   16   0.50000    10    395
 20     74.3000   1.27553    5   0.04000     3     28
 21     77.0900   1.23618    5   0.06000     3     28
 22     80.7850   1.18870    6   0.25000     4     67
 23     84.8700   1.14160    3   0.14000     2     32
 24     88.7900   1.10106    6   0.30000     4     69

```

Lampiran 15. Hasil XRD sampel geopolimer dari prekursor abu terbang alami

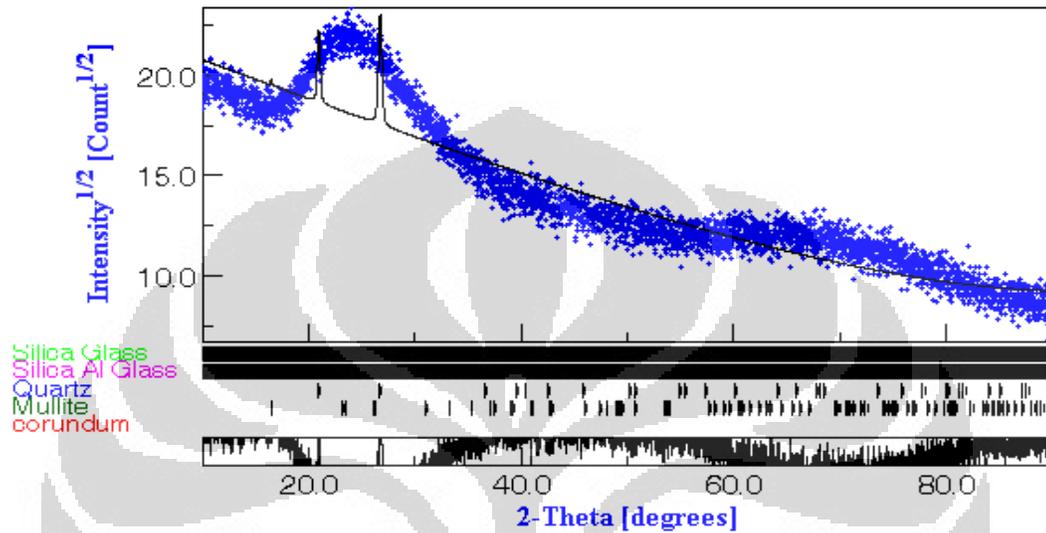
	A	B	C	D	E	F
1	5.01	74				
2	5.03	71				
3	5.05	67				
4	5.07	94				
5	5.09	114				
6	5.11	102				
7	5.13	71				
8	5.15	86				
9	5.17	83				
10	5.19	83				
11	5.21	92				
12	5.23	106				
13	5.25	85				
14	5.27	83				
15	5.29	79				
16	5.31	88				
17	5.33	88				
18	5.35	88				
19	5.37	94				
20	5.39	94				
21	5.41	88				
22	5.43	90				

Lampiran 16. Hasil XRD sampel geopolimer dari prekursor metakaolin alami

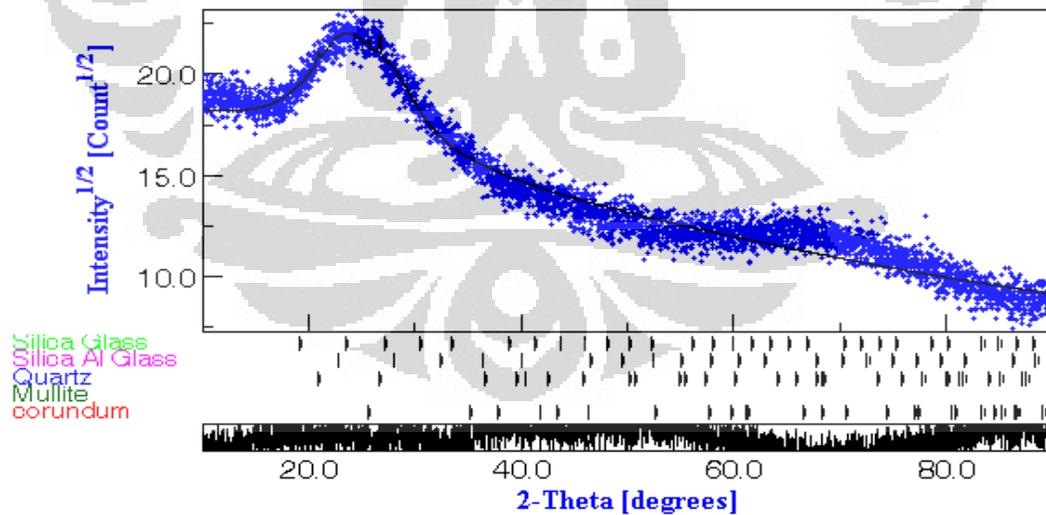


	A	B	C	D	E	F
1	15	48				
2	15.02	44				
3	15.04	40				
4	15.06	36				
5	15.08	50				
6	15.1	31				
7	15.12	45				
8	15.14	45				
9	15.16	45				
10	15.18	38				
11	15.2	42				
12	15.22	37				
13	15.24	30				
14	15.26	41				
15	15.28	41				
16	15.3	46				
17	15.32	40				
18	15.34	38				
19	15.36	44				
20	15.38	29				
21	15.4	53				
22	15.42	48				
23	15.44	32				
24	15.46	53				

Lampiran 17. Grafik perhitungan XRD kuantitatif sampel prekursor *fly ash glassy* dan *fly ash* semikristalin

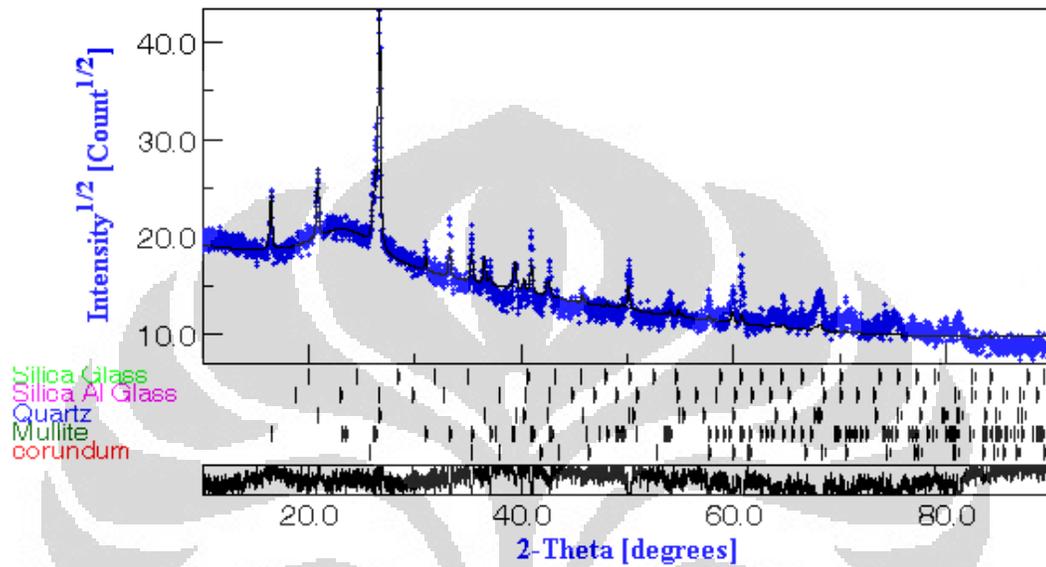


Prekursor *fly ash glassy*

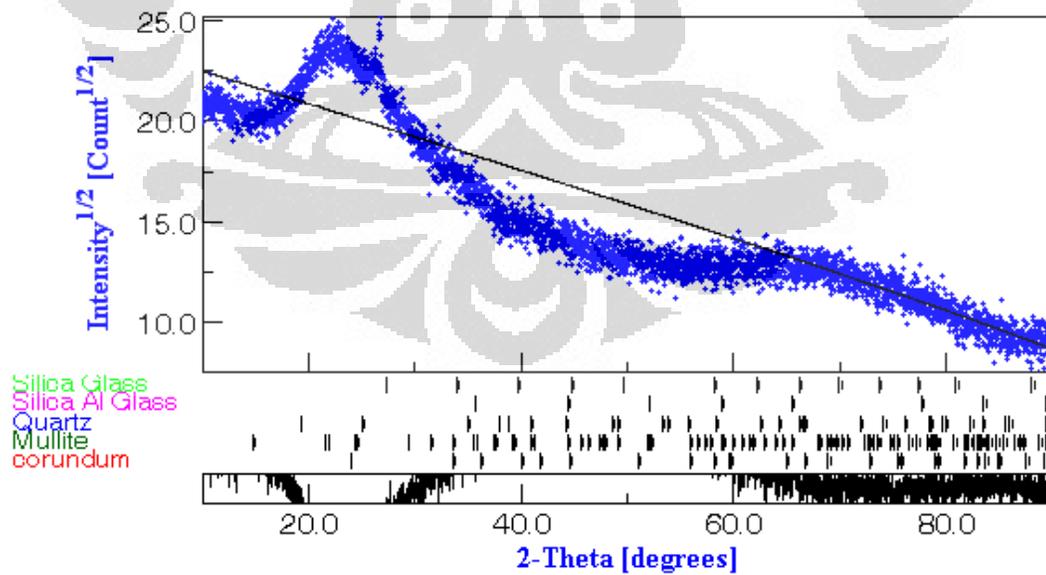


Prekursor *fly ash* semikristalin

Lampiran 18. Grafik perhitungan XRD kuantitatif sampel prekursor *fly ash* kristalin dan metakaolin *glassy*

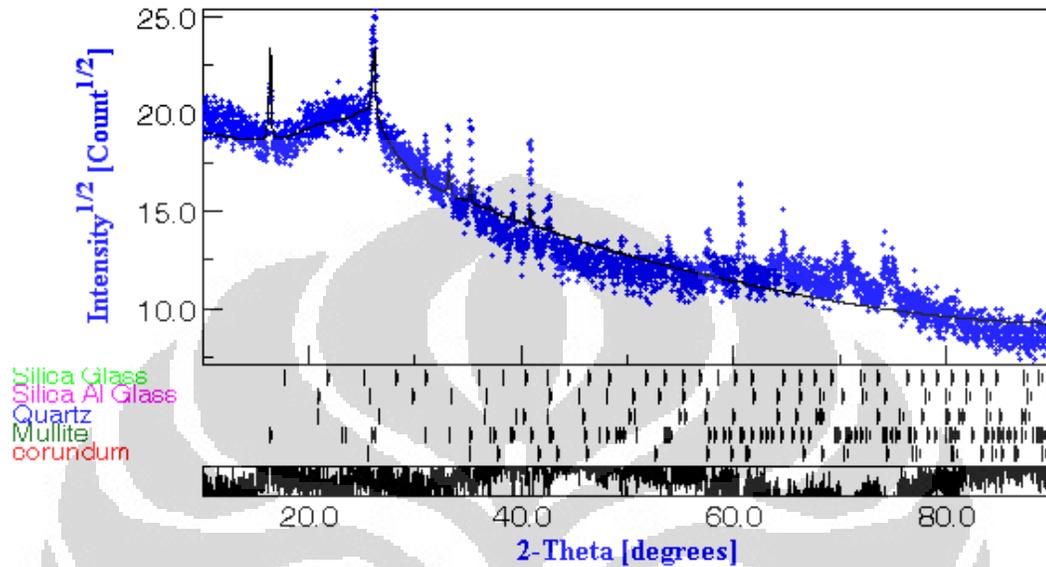


Prekursor *fly ash* kristalin

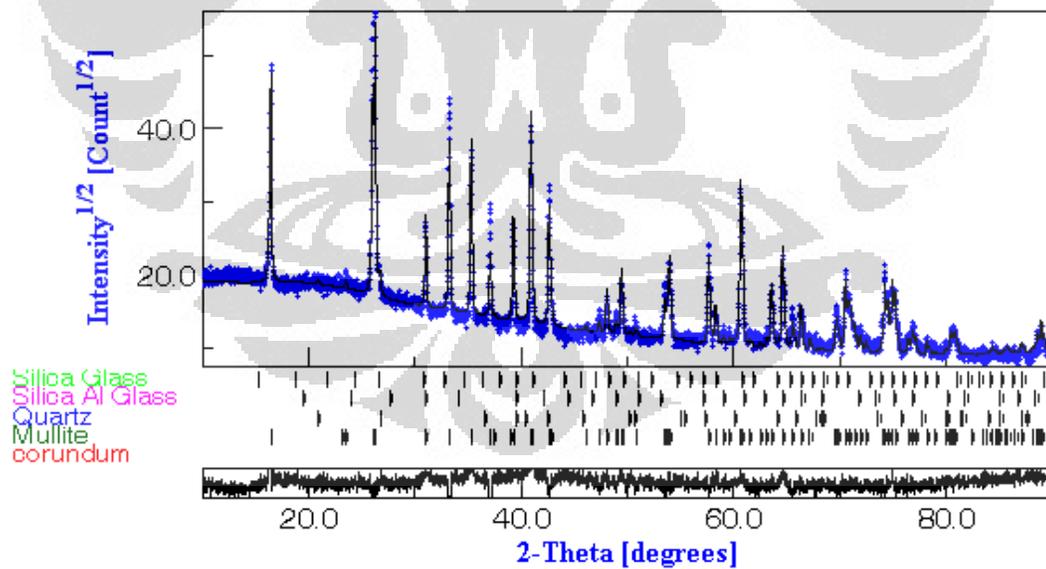


Prekursor metakaolin *glassy*

Lampiran 19. Grafik perhitungan XRD kuantitatif sampel prekursor metakaolin semikristalin dan metakaolin kristalin

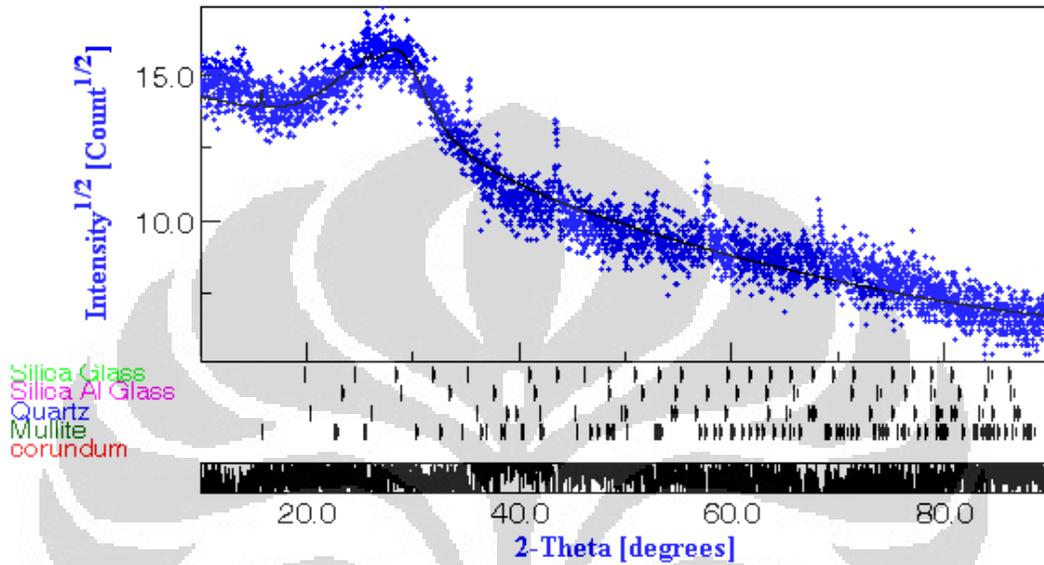


Prekursor metakaolin semikristalin

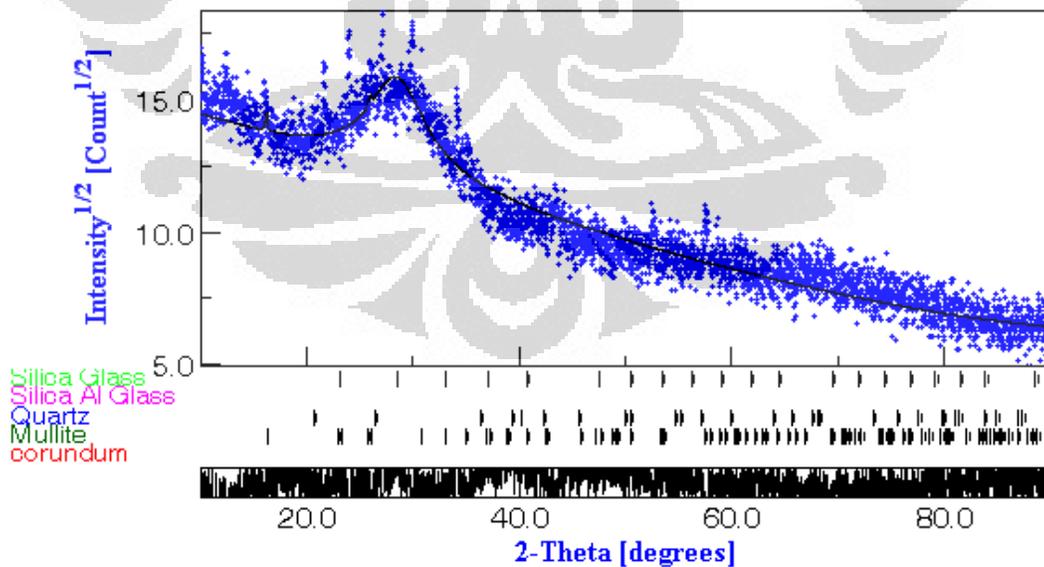


Prekursor metakaolin kristalin

Lampiran 20. Grafik perhitungan XRD kuantitatif sampel geopolimer dari prekursor *fly ash glassy* sintetis dan geopolimer dari prekursor *fly ash* semikristalin sintetis

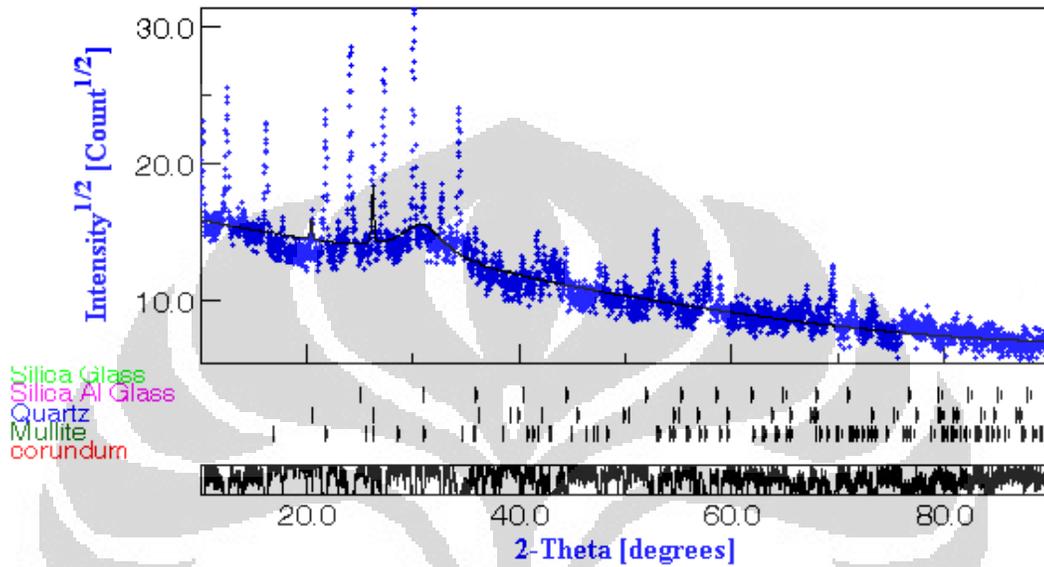


Geopolimer dari prekursor *fly ash glassy* sintetis

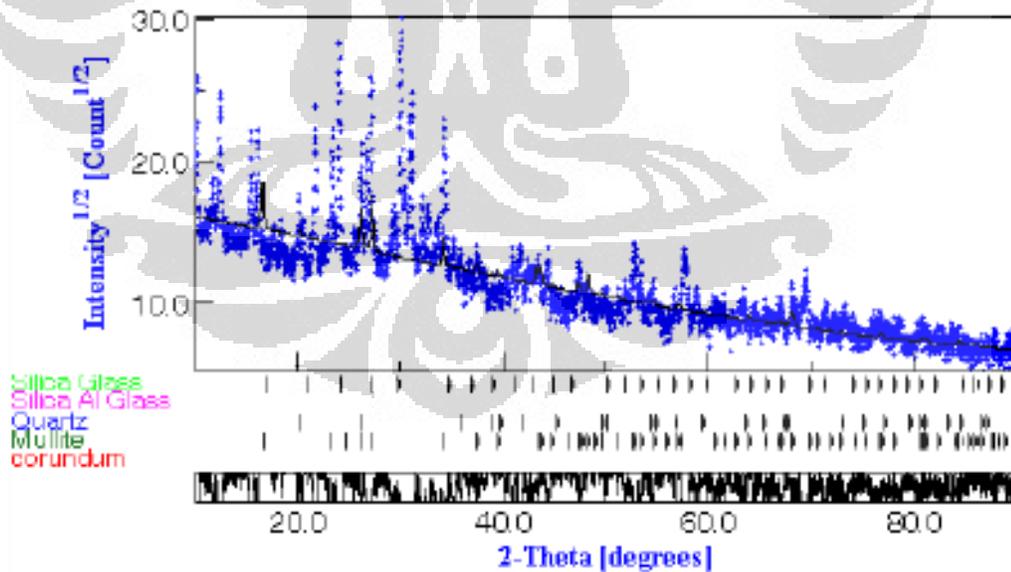


Geopolimer dari prekursor *fly ash* semikristalin sintetis

Lampiran 20. Grafik perhitungan XRD kuantitatif sampel geopolimer dari prekursor metakaolin *glassy* sintetis dan geopolimer dari prekursor metakaolin semikristalin sintetis



Geopolimer dari prekursor metakaolin *glassy* sintetis



Geopolimer dari prekursor metakaolin semikristalin sintetis