



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU *CURING*
TERHADAP KUAT TEKAN PASTA GEOPOLIMER
BERBAHAN DASAR ABU TERBANG**

SKRIPSI

FERDY

0606074855

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ferdy

NPM : 0606074855

Tanda Tangan :

Tanggal : 9 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Ferdy
NPM : 0606074855
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Temperatur dan Waktu *Curing* terhadap
Kuat Tekan Pasta Geopolimer Berbahan Dasar Abu
Terbang

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

DEWAN PENGUJI

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

Penguji 1 : Dr.-Ing. Hengki W Ashadi ()

Penguji 2 : Dwi Marta Nurjaya, ST., MT ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Metalurgi dan Material di Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai masa penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi, dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
- (2) Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi, DEA selaku pembimbing akademik. Terima kasih untuk perhatian dan dukungan dari masa perkuliahan sampai masa penyusunan skripsi ini.
- (3) Laboratorium Struktur & Material Departemen Teknik Sipil FTUI atas bantuannya untuk melakukan dan memperoleh data pengujian.
- (4) Orang tua dan anggota keluarga lainnya yang telah memberi dukungan, semangat, dan doa sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.
- (5) Frederick Paulus dan Niken Swastika sebagai partner dan sahabat yang telah memberi banyak bantuan dalam menyelesaikan skripsi ini.
- (6) Teman-teman metalurgi 2006 yang telah membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa banyak manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 9 Juli 2010

Penulis

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

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

Nama : Ferdy
NPM : 0606074855
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**Pengaruh Temperatur dan Waktu *Curing* terhadap Kuat Tekan
Pasta Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang**

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 atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 9 Juli 2010

Yang menyatakan

(Ferdy)

ABSTRAK

Nama : Ferdy
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Temperatur dan Waktu *Curing* terhadap Kuat Tekan Pasta Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang

Perubahan iklim telah memicu perkembangan *green technology*. Geopolimer berbahan dasar abu terbang merupakan material ramah lingkungan yang dapat digunakan sebagai semen instan untuk bahan reparasi jalan beton. Tujuan dari penelitian ini ialah mengetahui kondisi perlakuan temperatur dan waktu *curing* yang terbaik untuk menghasilkan pasta geopolimer dengan kuat tekan yang optimal. Dua variabel temperatur dan tiga variabel waktu digunakan dalam penelitian ini untuk ditinjau pengaruhnya terhadap kuat tekan yang dihasilkan oleh pasta geopolimer. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa untuk waktu *curing* yang sama, temperatur yang lebih tinggi akan menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Pada temperatur yang sama kuat tekan dari pasta geopolimer meningkat seiring dengan bertambahnya waktu *curing*.

Kata kunci : geopolimer, waktu *curing*, temperatur *curing*.

ABSTRACT

Name : Ferdy
Study Program : Metallurgy & Materials Engineering
Title : Effect of temperature and curing time to compressive strength of geopolymer paste fly ash based

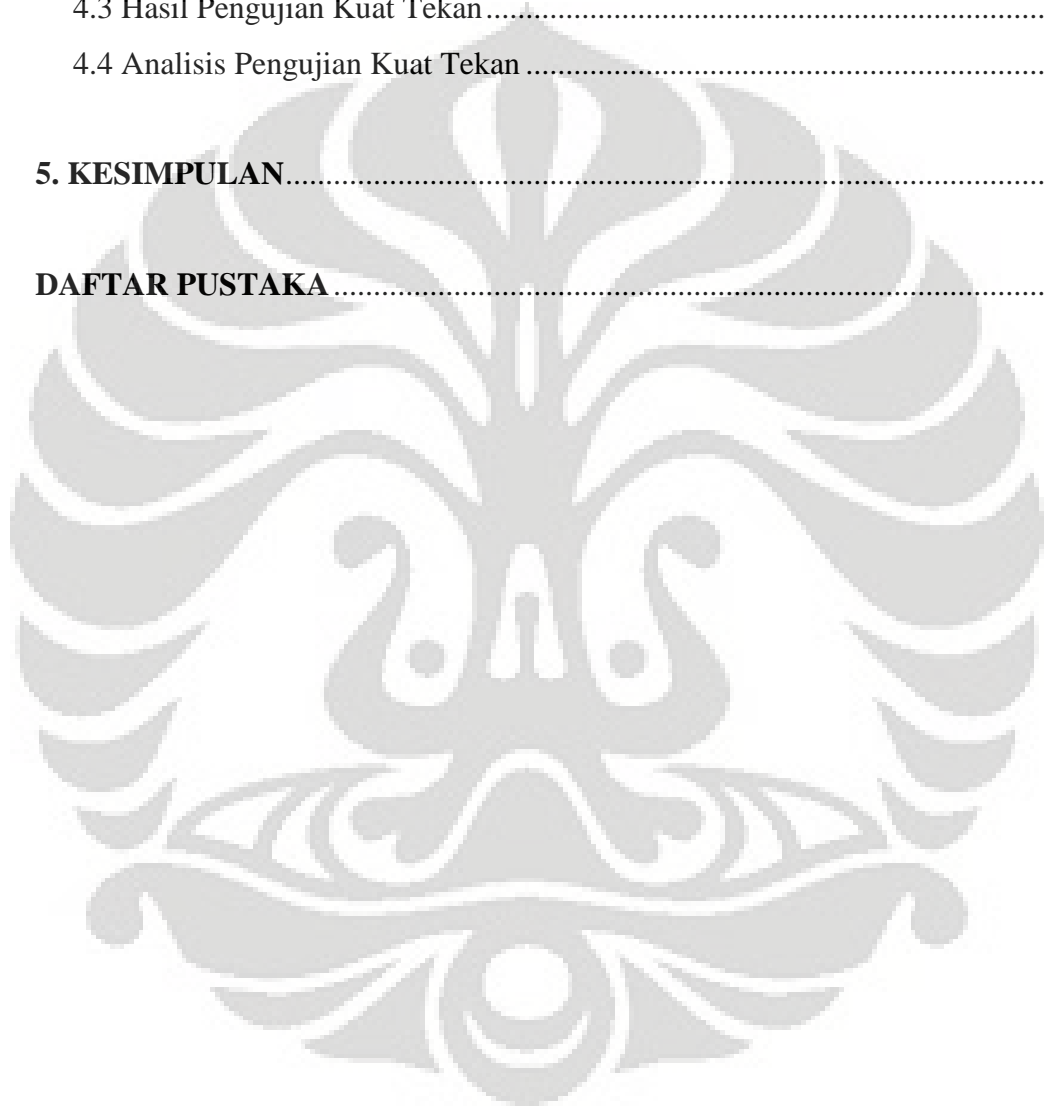
Climate change have been develop green technology. Geopolymer fly ash based is categorized as friendly environment material which is used as rapid setting cement for repair material of concrete road. The purpose of this research was aimed to study the best temperature and curing time to produce geopolymer paste with optimum compressive strength. Two variable of temperature and three variable of time were used in this research to see their effect to compressive strength. The result from this research show that for the same curing time, elevated temperature achieve higher compressive strength. In same temperature, compressive strength from geopolymer paste increase along with curing time.

Keywords: geopolymer, curing time, curing temperature.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
2. DASAR TEORI	6
2.1 Material Geopolimer	6
2.2 Abu Terbang.....	10
2.3 Larutan Alkali Aktivator	14
2.4 Reaksi Polimerisasi	16
3. METODOLOGI PENELITIAN	20
3.1 Diagram Alir.....	20
3.2 Alat dan Bahan	21
3.3 Komposisi.....	28
3.4 Karakterisasi Prekursor	29
3.5 Persiapan Penelitian	30
3.6 Pembuatan Pasta Geopolimer.....	31

3.7 Pengujian Kuat Tekan	32
3.8 Pengamatan SEM	33
4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	34
4.1 Pengujian Prekursor	34
4.2 Komposisi Pasta Geopolimer	35
4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan	36
4.4 Analisis Pengujian Kuat Tekan	39
5. KESIMPULAN.....	43
DAFTAR PUSTAKA	44



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan komposisi kimia abu terbang	13
Tabel 2.2 Sifat kimia dan fisika abu terbang berdasarkan ASTM C 618	14
Tabel 3.1 Jumlah sampel uji	21
Tabel 4.1 Komposisi kimia abu terbang hasil uji XRF	34
Tabel 4.2 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer pada temperatur <i>curing</i> 90 ⁰ C....	36
Tabel 4.3 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer pada temperatur <i>curing</i> 150 ⁰ C..	38



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur kimia polysialate	8
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	20
Gambar 3.2 Mixer	22
Gambar 3.3 (a) Cetakan pasta tiga kubus.....	22
Gambar 3.3 (b) Cetakan pasta enam kubus.....	22
Gambar 3.4 Plastik	23
Gambar 3.5 (a) Timbangan digital lab metalografi.....	23
Gambar 3.5 (b) Timbangan digital lab struktur dan material	23
Gambar 3.6 Wadah plastik anti panas.....	24
Gambar 3.7 (a) Oven Carbolite rhf 1600	24
Gambar 3.7 (b) Oven Fuji electric PXR - 4	25
Gambar 3.8 <i>Thermocouple</i>	25
Gambar 3.9 Mesin uji kuat tekan	26
Gambar 3.10 Abu terbang	27
Gambar 3.11 (a) Natrium hidroksida	27
Gambar 3.11 (b) Natrium silikat	27
Gambar 4.1 Pasta geopolimer pada temperatur <i>curing</i> 90 ⁰ C selama 24 jam.....	37
Gambar 4.2 Pasta geopolimer pada temperatur <i>curing</i> 150 ⁰ C selama 24 jam.....	39
Gambar 4.3 Grafik perbandingan kuat tekan pasta geopolimer.....	40

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan raya merupakan kebutuhan yang tak terelakan lagi pada peradaban manusia modern seperti sekarang ini khususnya dalam hal kegiatan ekonomi karena mampu menolong orang untuk pergi atau mendistribusikan produk secara lebih cepat ke suatu tempat tujuan. Pembangunan dalam bidang ekonomi yang dilakukan oleh pemerintah sering dikaitkan dengan tersedianya infrastruktur yang memadai. Dengan tersedianya infrastruktur jalan raya yang bermutu maka perputaran roda ekonomi pada suatu wilayah akan makin cepat.

Jalan beton adalah jalan yang menggunakan semen sebagai pengikatnya. Jalan beton biasanya digunakan untuk ruas jalan dengan hirarki fungsional arteri yang berada di kawasan dalam maupun luar kota untuk melayani beban lalu lintas yang berat dan padat. Biaya pemeliharaan jalan beton dapat dikatakan sangat kecil walaupun biaya awalnya lebih tinggi dibandingkan dengan jalan aspal sehingga jalan beton digunakan pada ruas-ruas jalan yang sangat sibuk. Pembangunan yang makin cepat tentunya akan memerlukan lebih banyak jalan beton sebagai infrastruktur dan semen Portland sebagai pengikat antar agregatnya.

Kebutuhan dunia akan semen dari tahun ke tahun selalu menunjukkan adanya peningkatan sehingga kebutuhan akan semen Portland sebagai komponen utama pembuatan jalan beton juga meningkat. Diperkirakan bahwa produksi semen akan meningkat dari 1,5 milyar ton pada tahun 1995 menjadi 2,2 milyar ton pada tahun 2010^[1]. Dalam memproduksi semen Portland akan dihasilkan juga residu berupa karbon dioksida yang dihasilkan dari proses kalsinasi kapur dan pembakaran batu bara. Makin besar produksi semen Portland maka makin banyak pula jumlah emisi yang dilepaskan ke atmosfer yang dapat menimbulkan efek gas rumah kaca yang dapat menyebabkan perubahan iklim dan pemanasan global yang telah menjadi isu utama yang berkembang di seluruh tempat di dunia. M.Criado melaporkan bahwa produksi satu ton semen Portland melepaskan kira-kira satu ton gas CO₂ ke atmosfer^[2]. Harus diperhatikan bahwa keakuratan laporan ini masih kontroversial dan banyak diperdebatkan oleh para ahli.

Jika terjadi kerusakan pada jalan beton maka dapat mengakibatkan terganggunya arus lalu lintas yang dapat berdampak pada aktivitas perekonomian. Dalam perbaikan jalan beton biasanya menggunakan semen Portland yang memiliki kelemahan dalam proses pengerasannya. Hal ini akan mengganggu arus lalu lintas bila digunakan menambal jalan rusak di kawasan yang padat. Proses pengerasan beton dengan semen konvensional (portland tipe I) dapat mencapai kekuatan optimum setelah 28 hari dengan direndam air dahulu. Saat ada perbaikan jalan rusak, terjadi peningkatan jumlah kendaraan bermotor yang tidak sebanding dengan penambahan ruas jalan sehingga dapat menyebabkan kemacetan yang panjang

Pemanfaatan semen instan (*rapid setting cement*) untuk perbaikan jalan beton yaitu semen yang cepat keras dan dapat mencapai kekuatan tinggi dalam waktu relatif singkat merupakan salah satu alternatif yang dapat diterapkan. Semen geopolimer memiliki potensi sebagai semen instan. Kekuatan optimum geopolimer diperoleh dengan waktu yang lebih singkat bersamaan dengan proses pengerasan serta pengaruh suhu^[3]. Geopolimer merupakan material polimer anorganik yang tersusun atas atom Si dan Al yang tersusun dalam jaringan 3 dimensi.

Polimer anorganik alumina-silikat atau biasa dikenal dengan nama geopolimer merupakan hasil sintesis dari material yang terbuat dari limbah proses pembakaran batu bara yaitu abu terbang (*fly ash*)^[4]. Semen geopolimer dibuat dari material pengumpan (*precursor*) yang tersusun atas silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang diaktivasi oleh larutan alkali. Penggunaan abu terbang sebagai prekursor (pengumpan) untuk mengganti semen Portland lewat proses yang disebut polimer anorganik yang dipelopori oleh seorang ilmuwan Prancis, Prof. Joseph Davidovits dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengurangi penggunaan semen Portland konvensional yang kurang ramah lingkungan selama proses produksinya. Abu terbang sendiri tidak dapat mengeras seperti halnya semen, maka dibutuhkan larutan alkali aktivator untuk mengikat abu terbang^[5].

Abu terbang merupakan residu pembakaran batu bara dari PLTU Suralaya. Proses pembakaran ini menghasilkan residu yang unsur utamanya berupa oksida alumina dan silika. Karena terbentuk pada temperatur tinggi, struktur abu terbang umumnya *amorphous* dan reaktif. Walaupun abu terbang tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silika yang terkandung dalam abu terbang akan bereaksi secara kimia dengan aktivator yang berupa larutan alkali dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat.

1.2 Perumusan Masalah

Semen konvensional atau semen Portland ialah semen yang umum digunakan sejak lama dalam rangka perbaikan jalan beton. Semen Portland tipe 1 atau yang biasa disebut *ordinary Portland cement* memiliki karakteristik yang sangat baik dalam penggunaannya pada konstruksi beton secara umum sepanjang tidak berinteraksi dengan senyawa sulfat di dalam tanah^[6]. Namun, untuk mencapai sifat dan karakteristik yang diinginkan, proses pengerasan semen konvensional dapat mencapai kekuatan optimum setelah 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa kinetika reaksi yang terjadi cukup lambat yang mengakibatkan semen konvensional menjadi kurang efektif dan efisien dalam proses perbaikan jalan beton.

Semen lainnya selain Portland yang dapat digunakan untuk reparasi jalan beton ialah semen kalsium sulfoaluminat, semen magnesium fosfat, semen kalsium fluoroaluminat^[3]. Keterbatasan dari semen – semen tersebut adalah harganya yang cukup tinggi. Semen geopolimer dapat digunakan sebagai alternatif untuk menggantikan fungsi semen konvensional karena semen geopolimer memiliki karakteristik yang baik dalam memenuhi syarat untuk digunakan sebagai bahan reparasi jalan beton melalui proses polikondensasi. Melalui proses ini maka geopolimer akan mencapai kekuatan dalam waktu yang singkat yang bergantung pada jumlah energi yang diterima oleh geopolimer selama proses polikondensasi. Proses yang terjadi ialah reaksi yang bersifat endotermik dimana proses pengerasan (*curing*) ditentukan oleh temperatur.

Dalam penelitian ini akan dipelajari perilaku dan sifat mekanis dari semen geopolimer berbahan dasar abu terbang yang berupa kekuatan tekan setelah mengalami proses pengerasan (*curing*) dengan 3 variabel waktu dan 2 variabel temperatur pengerasan yang berbeda. Dari hasil pengujian ini diharapkan dapat diketahui variabel yang cocok dalam pembuatan semen geopolimer dengan proses yang efektif untuk menghasilkan kekuatan mekanis yang optimum.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kondisi perlakuan temperatur dan waktu *curing* yang terbaik untuk menghasilkan pasta geopolimer dengan kuat tekan yang optimal.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

1. Prekursor yang digunakan dalam penelitian ini merupakan abu terbang yang merupakan sisa pembakaran batu bara PLTU Suralaya.
2. Larutan alkali aktivator yang digunakan merupakan sodium silikat/*waterglass* (Na_2SiO_3) jenis PA (*pure analyze*) yang dijual secara bebas di pasar.
3. Natrium hidroksida (NaOH) yang digunakan jenis PA (*pure analyze*) berupa *pellet* yang juga dijual secara bebas di pasar.
4. Air yang digunakan ialah aquades yang diperoleh dari Departemen Metalurgi dan Material FTUI.
5. Untuk komposisi pasta geopolimer dilakukan berdasarkan *trial and error* dengan variasi komposisi pembentuk larutan alkali aktivator.
6. Parameter yang digunakan ialah temperatur *curing* pada 90°C & 150°C dan waktu *curing* yaitu 4, 8, 24 jam.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika tersebut digambarkan dalam bentuk bab-bab yang saling berkaitan satu sama lain. Adapun sistematika penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan

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

Bab 2 Dasar Teori

Pada bab ini akan dijelaskan tentang studi literatur material geopolimer berbahan dasar abu terbang yang berkaitan dengan penelitian ini.

Bab 3 Metodologi Penelitian

Bab ini memberikan penjelasan tentang tahapan – tahapan yang dilakukan dalam penelitian. Bab ini mencakup langkah kerjayang berisi karakterisasi, preparasi sampel, pembuatan sampel pasta geopolimer berbahan dasar abu terbang, serta pengujian yang dilakukan terhadap produk akhir.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini menjelaskan dan menampilkan data hasil percobaan, proses pengolahan data hasil percobaan, dan analisa hasil percobaan yang akan dibandingkan dengan literatur.

Bab 5 Kesimpulan

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil kegiatan penelitian dan analisa yang telah dilakukan berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian.

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

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Material Geopolimer

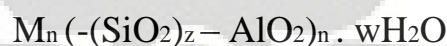
Geopolimer dapat didefinisikan sebagai material yang dibentuk melalui polimerisasi silikon, aluminium, dan oksigen menjadi struktur *amorphous* 3 dimensi. Geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Davidovits sejak tahun 70-an. Dinamakan demikian karena merupakan sintesa bahan-bahan alam nonorganik lewat proses polimerisasi. Bahan dasar utama yang diperlukan untuk pembuatan material geopolimer ini adalah bahan-bahan yang banyak mengandung unsur-unsur silikon dan aluminium. Prekursor yang digunakan dalam pembuatan geopolimer dapat berasal dari limbah industri yang mengandung mineral aluminosilikat. Limbah industri yang memiliki banyak kandungan alumina dan silika diantaranya adalah *blast furnace slag*, abu terbang (*fly ash*), serbuk granit dan lumpur merah (*red mud*).

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan melaporkan geopolimer memiliki kekuatan awal yang tinggi, penyusutan (*shrinkage*) yang rendah, *freeze-thaw resistance*, ketahanan terhadap sulfat, ketahanan terhadap korosi, ketahanan terhadap asam, ketahanan terhadap api, dan reaksi agregat alkali yang tidak berbahaya. Semen geopolimer lebih unggul daripada semen Portland dalam hal ketahanan panas dan api dimana semen Portland mengalami penurunan kekuatan tekan yang cepat pada 300°C, sedangkan semen geopolimer tetap stabil sampai dengan 600°C^[7]. Telah dibuktikan pula bahwa penyusutan pada geopolimer jauh lebih rendah dibandingkan semen Portland.

Keberadaan alkali dalam semen atau beton Portland dapat menimbulkan *Alkali-Aggregate-Reaction* (AAR) yang berbahaya. Namun hal ini tidak terjadi pada geopolimer, bahkan pada geopolimer yang memiliki kandungan alkali yang lebih tinggi. Davidovits membuktikan bahwa berdasarkan ASTM C227 yaitu pengujian *bar expansion*, semen geopolimer dengan kandungan alkali yang jauh lebih tinggi dibandingkan semen Portland tidak menimbulkan AAR yang berbahaya. Namun Song melaporkan bahwa kekuatan tekan geopolimer mengalami penurunan setelah kontak dengan asam, bergantung pada jangka waktu kontaknya^[8].

Tidak seperti semen Portland, geopolimer tahan terhadap asam. Sebagaimana ditunjukkan oleh pengujian terhadap asam dimana sampel direndam di dalam 5 asam sulfat dan asam klorida, semen geopolimer relatif stabil dengan kehilangan berat hanya sekitar 5-8%. Sementara itu semen Portland menunjukkan kehilangan berat sebesar 30-60%^[9]. Dengan mengamati kehilangan berat setelah kontak dengan asam, para peneliti tersebut menyimpulkan bahwa geopolimer atau beton geopolimer jauh lebih baik daripada semen Portland dalam hal ketahanan asam sebagaimana ditunjukkan oleh kehilangan beratnya yang jauh lebih kecil.

Objek yang pertama kali diteliti oleh Davidovits adalah tentang struktur mineral dari piramid. Sebelumnya, piramid dibuat dengan menyusun balok-balok raksasa, namun berdasarkan penelitian Davidovits, piramid dibuat dengan metode re-aglomerasi batuan. Komposisi kimia material geopolimer mirip dengan zeolit yaitu sama – sama mengandung kerangka Si-O-Al namun geopolimer memiliki struktur yang bersifat amorf^[10]. Reaksi yang terjadi ialah reaksi eksotermis pada temperatur rendah dibawah 100⁰C. Davidovits juga menganjurkan penggunaan istilah *polysialate* untuk geopolimer berbasis silka-aluminat^[11]. Sialat ialah singkatan dari dari silikon-okso-aluminat (*silico-oxo-aluminate*) dengan rumus sebagai berikut^[9] :



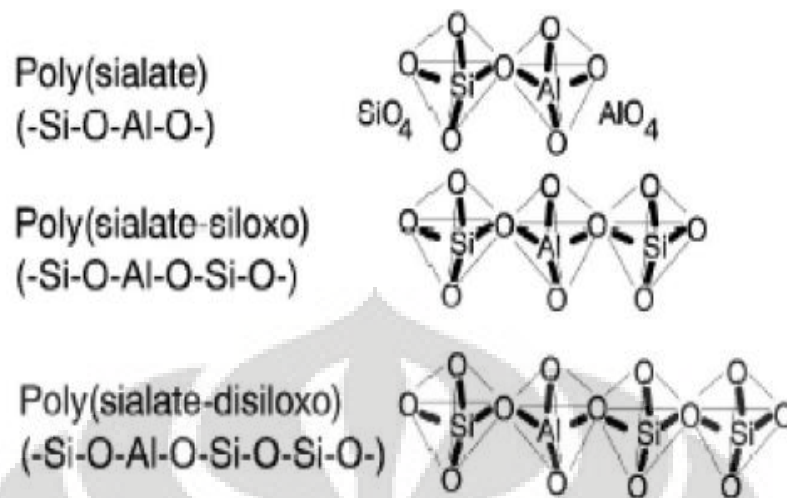
dimana : M → elemen alkali kation monovalen seperti kalium atau natrium

n → derajat polikondensasi atau polimerisasi

z → bilangan 1, 2, 3, ... 32

- → simbol ikatan

Davidovit juga 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)^[11]. Struktur dari polysialate-polysialate ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.1 Struktur kimia polysialate^[10]

Dibandingkan dengan Semen Portland biasa, geopolimer memiliki keunggulan yaitu lebih ramah lingkungan dan hemat energi. Material geopolimer juga dapat berperan dalam immobilisasi logam berat^[12]. Geopolimer dikatakan ramah lingkungan karena selain dapat menggunakan bahan-bahan buangan industri, proses pembuatan material geopolimer juga tidak terlalu memerlukan energi yang besar seperti halnya proses pembuatan semen yang memerlukan suhu tinggi. Oleh karena itu pembuatan material geopolimer mampu menurunkan emisi gas rumah kaca yang diakibatkan oleh proses produksi semen hingga tinggal 20 persen saja. Selain ramah lingkungan material geopolimer juga memiliki beberapa keunggulan lainnya yaitu :

1. Jumlah bahan mentah yang banyak dalam pembuatan geopolimer. Sejumlah senyawa aluminosilikat yang mudah larut dalam larutan alkali aktivator dapat menjadi bahan mentah dalam pembuatan geopolimer misalnya abu terbang dan kaolin.
2. Hemat energi. Pembuatan geopolimer tidak membutuhkan konsumsi energi yang besar karena proses pembuatan geopolimer terjadi melalui proses termal pada temperatur rendah.

3. Teknik preparasi yang sederhana. Geopolimer dapat dibuat dengan mencampurkan senyawa aluminosilikat yang bersifat reaktif dengan larutan alkali aktivator lalu *dicuring* pada temperatur ruang. Dalam waktu yang singkat maka geopolimer akan mengeras mencapai kekuatan tekan tertentu.
4. Stabilitas volume/dimensi yang baik
5. Kekuatan tekan yang dapat dicapai dalam waktu singkat. Geopolimer dapat mencapai 70 % kekuatan tekannya dalam waktu 4 jam periode *curing*.
6. *Durability* yang sangat baik.
7. Ketahanan panas yang baik.
8. Konduktivitas termal yang rendah.

Sebagaimana telah diketahui, produksi Semen Portland juga akan menghasilkan gas karbondioksida yang menyebabkan efek rumah kaca. Jadi dalam rangka mengurangi efek *global warming*, rasanya cukup bijak jika kita mengurangi penggunaan semen konvensional Portland dan beralih ke geopolimer. Geopolimer tidak memiliki efek samping terhadap efek rumah kaca bahkan bisa dibuat dari *fly ash*, hasil limbah pembakaran batubara, yang termasuk limbah berat. Penelitian yang dilakukan oleh Xu dan Van Deventer menunjukkan bahwa material geopolimer dapat dibuat dari mineral aluminosilikat seperti *fly ash*^[13].

Geopolimer sebagai material yang relatif baru sangat potensial untuk menggantikan semen Portland terutama dalam aplikasinya sebagai bahan dasar pembuatan beton. Pada beton geopolimer, reaksi polimerisasi adalah polikondensasi membentuk aluminosilikat. Pada proses polimerisasi geopolimer sejumlah Si dan Al terdisolusi dengan alkali aktivator membentuk monomer-monomer. Monomer-monomer tadi akan terkondensasi membentuk jaringan tetrahedral. Reaktan yang digunakan biasanya kaolinite atau metakaolin atau dapat juga material yang kaya akan SiO_2 dan Al_2O_3 seperti *fly ash*. Ikatan kimia S-O dan Al-O merupakan ikatan kovalen yang paling stabil.

Material polimer anorganik alkali aluminosilikat dapat disintesis (dibuat) dari prekursor yang mengandung alumina dan silika berkonsentrasi tinggi. Prekursor adalah bahan utama dalam pembentuk geopolimer. Prekursor tersebut dapat berupa mineral alami ataupun limbah industri. Unsur – unsur kimia di dalam prekursor bila dicampur dengan larutan alkali sebagai aktivator, akan menghasilkan material pasta geopolimer dengan kekuatan mengikat. Van Jaarsveld melaporkan bahwa ukuran partikel, kandungan kalsium, kandungan logam alkali, kandungan amorf, dan morfologi serta asal dari abu terbang mempengaruhi sifat-sifat dari geopolimer^[13].

Setiap prekursor memiliki kelebihan dan kekurangannya. Sebagai contoh, metakaolin sebagai prekursor memiliki kemampuan melarutkan tinggi dalam larutan reaktan, menghasilkan rasio Si/Al yang terkontrol dalam geopolimer, dan memiliki warna yang putih. Namun metakaolin relatif lebih mahal untuk diproduksi dalam jumlah besar karena ia harus dikalsinasi pada temperatur sekitar 500-700°C selama beberapa jam. Dalam hal ini penggunaan abu terbang sebagai prekursor akan menguntungkan jika dilihat dari sisi ekonomi^[6].

2.2 Abu Terbang

Abu terbang (*fly ash*) merupakan hasil samping pembakaran batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan ukuran partikel berkisar antara 0.5 –100 μm . PLTU berbahan bakar batubara biasanya menghasilkan limbah padat dalam bentuk abu. Abu batubara yang merupakan limbah dari proses pembangkit tenaga listrik tersebut dapat berupa abu terbang, abu dasar dan lumpur *flue gas desulfurization*. Produksi abu terbang batubara (*fly ash*) didunia akan bertambah seiring dengan bertambahnya penggunaan batubara dalam menghasilkan energi. Abu terbang (*fly ash*) sebagai limbah PLTU berbahan bakar batu bara dikategorikan oleh Bapedal sebagai limbah berbahaya (B3). Bahan berbahaya yang terkandung dalam abu terbang antara lain : arsenik (43,4 ppm), barium (806 ppm), berillium (5 ppm), boron (311 ppm), kadmium (3,4 ppm), kromium (136 ppm), kromium VI (90 ppm); kobalt (35,9 ppm), tembaga (112 ppm), fluor (29 ppm), timbal (56 ppm), mangan (250 ppm), nikel (77,6 ppm), selenium (7,7 ppm), stronsium (775 ppm), talium (9 ppm), vanadium (252 ppm), dan seng (178 ppm)^[14].

Penyumbang produksi abu terbang batubara terbesar adalah sektor pembangkit listrik. Abu terbang batubara umumnya dibuang di *landfill* atau ditumpuk begitu saja di dalam area industri. Abu tersebut selanjutnya dipindahkan ke lokasi penimbunan abu dan terakumulasi di lokasi tersebut dalam jumlah yang sangat banyak. Dengan bertambahnya jumlah abu batubara maka ada usaha-usaha untuk memanfaatkan limbah padat tersebut. Berbagai penelitian mengenai pemanfaatan abu terbang batubara sedang dilakukan untuk meningkatkan nilai ekonomisnya serta mengurangi dampak buruknya terhadap lingkungan. Saat ini umumnya abu terbang digunakan dalam pabrik semen sebagai salah satu bahan campuran pembuat beton. Selain itu, sebenarnya abu terbang memiliki berbagai kegunaan yang amat beragam seperti :

1. Penyusun beton untuk jalan dan bendungan
2. Penimbun lahan bekas pertambangan
3. *Recovery* magnetit, cenosphere, dan karbon
4. Bahan baku keramik, gelas, batu bata, dan refraktori
5. Bahan penggosok (*polisher*)
6. Filler aspal, plastik, dan kertas
7. Pengganti dan bahan baku semen
8. Aditif dalam pengolahan limbah (*waste stabilization*)
9. Konversi menjadi zeolit dan adsorben

Konversi abu terbang batubara menjadi zeolit dan adsorben merupakan contoh pemanfaatan efektif dari abu terbang batubara. Keuntungan adsorben berbahan baku abu terbang batubara adalah biayanya murah. Selain itu, adsorben ini dapat digunakan baik untuk pengolahan limbah gas maupun limbah cair. Adsorben ini dapat digunakan dalam penyisihan logam berat dan senyawa organik pada pengolahan limbah. Abu terbang batubara dapat dipakai secara langsung sebagai adsorben atau dapat juga melalui perlakuan kimia dan fisik tertentu sebelum menjadi adsorben.

Zeolit yang disintesis dari abu terbang batubara banyak digunakan untuk keperluan pertanian. Zeolit banyak dikonsumsi dalam pemurnian air, pengolahan tanah, dll. Zeolit dibuat dengan cara mengkonversi aluminosilikat yang terdapat pada abu terbang batubara menjadi kristal zeolit melalui reaksi hidrotermal.

Abu terbang - disebut demikian karena ukuran partikelnya yang kecil sehingga mudah beterbangan oleh udara. Secara kimia abu batubara merupakan mine-ral alumino silikat yang banyak mengandung unsur-unsur Ca, K, dan Na di samping juga mengandung sejumlah kecil unsur C dan N. Selama ini abu terbang lebih banyak tidak dimanfaatkan dengan baik ataupun dipakai hanya sebagai bahan timbunan. Penimbunan yang sembarangan berpotensi mengancam kelestarian lingkungan, selain mudah beterbangan dan mengotori udara sehingga jika terhirup dapat mengganggu pernapasan, partikel-partikel logam berat yang dikandungnya dengan mudah larut dan mencemari sumber -sumber air. Untuk melarutkan unsur-unsur silikon dan aluminium yang terdapat pada abu terbang, serta memungkinkan terjadinya reaksi kimiawi, digunakan larutan yang bersifat alkalis.

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 batubara ialah: $\text{Si}_{1,0}\text{Al}_{0,45}\text{Ca}_{0,51}\text{Na}_{0,047}\text{Fe}_{0,039}\text{Mg}_{0,020}\text{K}_{0,013}\text{Ti}_{0,011}$ ^[15]. Sifat kimia dari abu terbang batubara dipengaruhi oleh jenis batubara yang dibakar dan teknik penyimpanan serta penanganannya. Pembakaran batubara lignit dan *sub-bituminous* menghasilkan abu terbang dengan kalsium dan magnesium oksida lebih banyak daripada *bituminous*. Namun, memiliki kandungan silika, alumina, dan karbon yang lebih sedikit daripada *bituminous*. Abu terbang batubara terdiri dari butiran halus yang umumnya berbentuk bola padat atau berongga. Ukuran partikel abu terbang hasil pembakaran batubara bituminous lebih kecil dari $0,075\text{mm}$ ^[16]. 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].

Berdasarkan standar yang diatur dalam 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]. 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*. Abu terbang tipe F biasanya memiliki kandungan kapur (CaO) kurang dari 10 % sedangkan tipe C mengandung lebih dari 20 % CaO. Tabel 2.1 di bawah ini menampilkan komposisi kimia abu terbang dan tabel 2.2 menampilkan perbedaan sifat kimia dan fisika abu terbang berdasarkan spesifikasi ASTM C 618.

Tabel 2.1 Perbandingan komposisi kimia abu terbang^[15]

Komponen	<i>Bituminous</i>	<i>Subbituminous</i>	Lignit
SiO ₂	20 – 60 %	40 – 60 %	15 – 45 %
Al ₂ O ₃	5 – 35 %	20 – 30 %	10 – 25 %
Fe ₂ O 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 ₂ O	0 – 4 %	0 – 2 %	0 – 6 %
K ₂ O	0 – 3 %	0 – 4 %	0 – 4 %
LOI	0 – 15 %	0 – 3 %	0 – 5 %

Tabel 2.2 Sifat kimia dan fisika abu terbang berdasarkan ASTM C 618^[19]

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 alkalies 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.			

2.3 Larutan Alkali Aktivator

Larutan alkali aktivator merupakan larutan yang dibutuhkan untuk memungkinkan terjadinya reaksi polimerisasi monomer alumina dan silika. Larutan alkali berasal dari logam alkali yang dapat larut, yang pada umumnya adalah larutan berbasis natrium atau kalium. Larutan alkali aktivator akan mengaktifkan prekursor dengan mendisolusikan prekursor ke dalam monomer [SiO₄] dan [AlO₄]. Selama proses *curing*, monomer – monomer tadi akan terkondensasi dan membentuk jaringan polimer tiga-dimensi yang berikatan silang. Ion alkali bertindak sebagai penetral muatan (*charge balancer*) untuk tiap molekul tetrahedron [AlO₄].

Proses *curing* merupakan proses yang penting karena dapat meningkatkan kekuatan beton geopolimer^[20]. Waktu yang diperlukan oleh pasta geopolimer untuk mengeras akan bervariasi tergantung dari komposisi material yang menyusun pasta geopolimer itu sendiri. Komposisi pasta geopolimer akan menentukan kuat tekan geopolimer itu sendiri. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Sanjayan Daniel dan Sagoe-Crentsil, rasio antara abu terbang dengan aktivator merupakan parameter yang berperan penting terhadap kuat tekan pasta geopolimer pada temperatur yang tinggi^[21].

Reaksi yang terjadi ialah reaksi yang bersifat endotermis yang menyerap panas dari lingkungan. Panas yang diserap akan mengakibatkan pasta mengeras karena telah terjadi polikondensasi dari alumina dan silika yang membentuk senyawa aluminosilikat. Jika temperatur *curing* semakin tinggi maka waktu *curing* untuk pasta geopolimer akan semakin singkat. Temperatur yang makin tinggi akan meningkatkan proses aktivasi abu terbang sehingga kuat tekan akan meningkat. Hasil penelitian ini mendukung penelitian yang dilakukan oleh Palomo, Grutzeck, dan Blanco yang menyatakan bahwa makin tinggi temperatur *curing* akan meningkatkan proses aktivasi abu terbang^[22].

Menurut A.Palomo, larutan alkali aktivator yang menghasilkan kuat tekan yang baik adalah campuran dari NaOH dengan natrium silikat atau KOH dengan kalium silikat^[22]. Tipe larutan alkali adalah faktor yang sangat penting dalam mempengaruhi kekuatan mekanis geopolimer. Kombinasi dari natrium silikat dan natrium hidroksida memberikan kekuatan tekan yang paling tinggi. Natrium hidroksida berperan dalam memutuskan ikatan pada silika dan alumina pada abu terbang untuk membentuk $[\text{SiO}_4]$ dan $[\text{AlO}_4]^-$ atau disebut sebagai proses disolusi^[6]. Selanjutnya sebagai substansi yang menimbulkan sifat basa pada larutan, keberadaan natrium hidroksida dinilai cukup penting dalam pembentukan struktur geopolimer tahap dua yaitu proses polikondensasi dimana hanya dapat terjadi dalam lingkungan yang cukup basa. Jumlah NaOH sebagai pembuat larutan aktivator akan mempengaruhi kuat tekan material geopolimer. Penelitian yang dilakukan oleh Djwantoro Hardjito yang berasal dari *Curtin University of Technology* menunjukkan bahwa makin besar jumlah NaOH yang digunakan akan menghasilkan kuat tekan geopolimer yang lebih besar^[23].

Larutan natrium silikat (*waterglass*) adalah bahan aktivator yang secara umum digunakan karena mudah didapat. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan digunakan natrium silikat dan natrium hidroksida. Penambahan aktivator natrium hidroksida bertujuan untuk menambah ion Na^+ pada proses polimerisasi. Natrium silikat digunakan karena dapat larut bersama air dimana selanjutnya natrium silikat menyumbangkan kation Na^+ sebagai penyeimbang muatan dalam struktur *cross-linked* aluminosilikat^[24]. Natrium silikat dapat terlarut dalam air yang akan menyediakan lingkungan untuk terjadinya reaksi cairan-padatan yang ideal untuk pelarutan prekursor. Kandungan natrium silikat menyediakan kation berikatan-valensi-satu (*monovalent*) $[\text{Na}^+]$ sebagai spesies aktivator dimana ion resiprokalnya Si^{4+} , adalah komposisi utama geopolimer. Kadar natrium silikat harus optimum dimana cukup dalam memenuhi kebutuhan kation monovalen penyeimbang dalam proses polikondensasi tanpa mengakibatkan terbentuknya natrium karbonat di permukaan sebagai efek kelebihan kandungan natrium silikat.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Palomo, Grutzeck, dan Blanco, penggunaan larutan natrium hidroksida (NaOH) dan larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) dapat menghasilkan kekuatan tekan yang tinggi. Kuat tekan dapat mencapai hingga 60 MPa jika di-*curing* pada suhu 85°C selama 5 jam^[22]. Penelitian lain yang dilakukan oleh Swanepoel dan Strydom menyatakan bahwa faktor waktu dan temperatur masa *curing* mempengaruhi kuat tekan geopolimer, dan kekuatan optimum terjadi ketika material di-*curing* pada suhu 60°C selama 48 jam^[7].

2.4 Reaksi Polimerisasi

Material polimer anorganik alkali aluminosilikat dapat disintesis dari prekursor yang mengandung alumina dan silika berkonsentrasi tinggi. Prekursor adalah bahan utama dalam pembentuk polimer. Prekursor untuk geopolimer berbasis alumina silikat harus kaya akan silikon dan aluminium yang dapat berupa mineral alami seperti kaolin, tanah liat, mika, andalusit, spinel dan lain sebagainya, dengan rumus empirisnya yang mengandung Si, Al, dan oksigen^[24].

Prekursor dapat pula berupa material yang berasal dari produk sampingan atau limbah industri seperti abu terbang, *silica fume*, *slag*, *rice-husk ash*, lumpur merah, dan lain lain. Pemilihan material asal untuk pembuatan geopolimer bergantung pada beberapa faktor seperti ketersediaan material asal, biaya, tipe aplikasi dan kebutuhan spesifik dari pemakai akhir.

Unsur – unsur kimia di dalam prekursor bila dicampur dengan larutan alkali sebagai aktivator akan menghasilkan material pasta geopolimer dengan kekuatan mengikat seperti pasta semen. Prekursor dan aktivator akan bersintesa membentuk material padat melalui proses polimerisasi, dimana proses polimerisasi yang terjadi adalah disolusi yang diikuti dengan proses polikondensasi. Proses sintesis tersebut terbagi atas proses aktivasi bahan alumina-silika oleh ion alkali dan proses *curing* untuk mendorong terjadinya polimerisasi dari monomer alumina-silika menjadi struktur jaringan molekul tiga-dimensi.

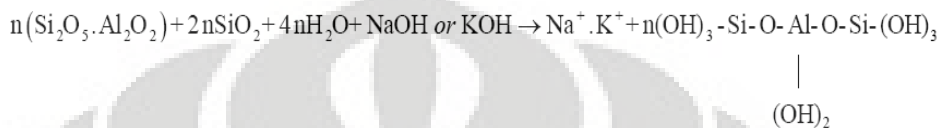
Kesempurnaan dari polimerisasi dapat dilihat dari stuktur dan sifat dari polimer anorganik yang telah tersintesis yang bergantung pada proses aktivasi dan proses pembentukan ikatan kimia yang terjadi. Hal penting yang berkaitan dengan sintesis polimer anorganik adalah derajat polimerisasinya karena derajat polimerisasi akan menentukan pembentukan struktur yang akan menentukan karakteristik akhir dari suatu material geopolimer yang dapat dijelaskan melalui rumus empiris sebagai berikut : $M_n (-(SiO_2)_z - AlO_2)_n \cdot wH_2O$.

Sintesa geopolimer aluminosilikat membutuhkan dua konstituen utama dalam reaksi pencampuran yaitu prekursor yang kaya akan kandungan Al dan Si dengan larutan alkali-silikat sebagai aktivator. Geopolimerisasi melibatkan reaksi kimia dari alumina-silikat oksida (Si_2O_5 , Al_2O_2) dengan alkali polisilikat yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al. Geopolimer dapat berupa salah satu dari 3 bentuk formula di bawah ini:

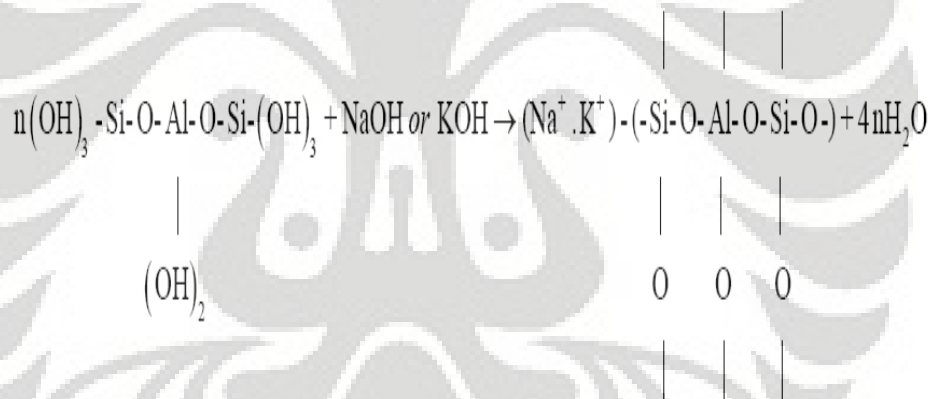
- Poly (sialate), formula monomer [-Si-O-Al-O-]
 - Poly (sialate-siloxo), formula monomer [-Si-O-Al-O-Si-O-]
 - Poly (sialate-disiloxo), formula monomer [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-]
- (*sialate* = *silicon-oxo-aluminate*, *siloxo* = *silicon-oxo*)

Reaksi kimia yang terjadi pada proses polimerisasi terbagi dalam 3 tahapan. Ketiga tahap di bawah ini dapat terjadi secara saling bergantian maupun terjadi secara bersamaan^[22]. 3 tahap proses polimerisasi tersebut adalah :

- 1) Disolusi atom Si dan Al dari sumber material prekursor disebabkan oleh ion hidroksida.
- 2) Penguraian ion prekursor menjadi monomer.



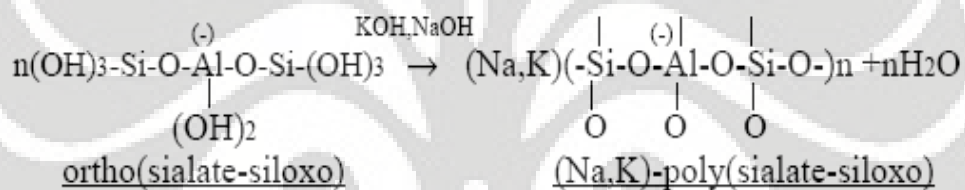
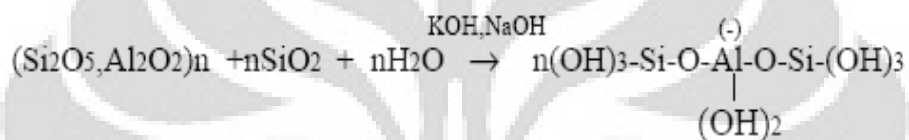
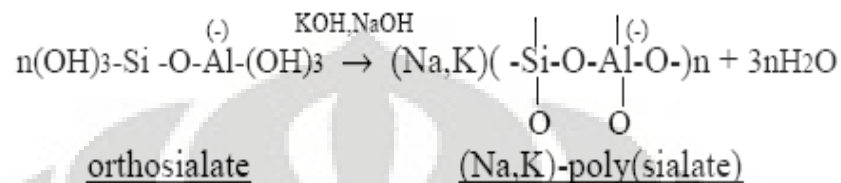
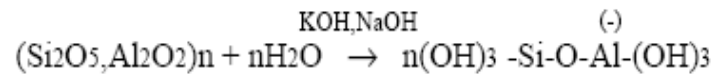
- 3) Polikondensasi dari monomer – monomer menjadi struktur polimer.



Proses geopolimerisasi akan menghasilkan pasta geopolimer dengan hasil samping H₂O yang secara ringkas dapat dijabarkan sebagai berikut :



Berdasarkan reaksi kimia yang terjadi proses polimerisasi dapat dilihat secara skematis seperti berikut ini :

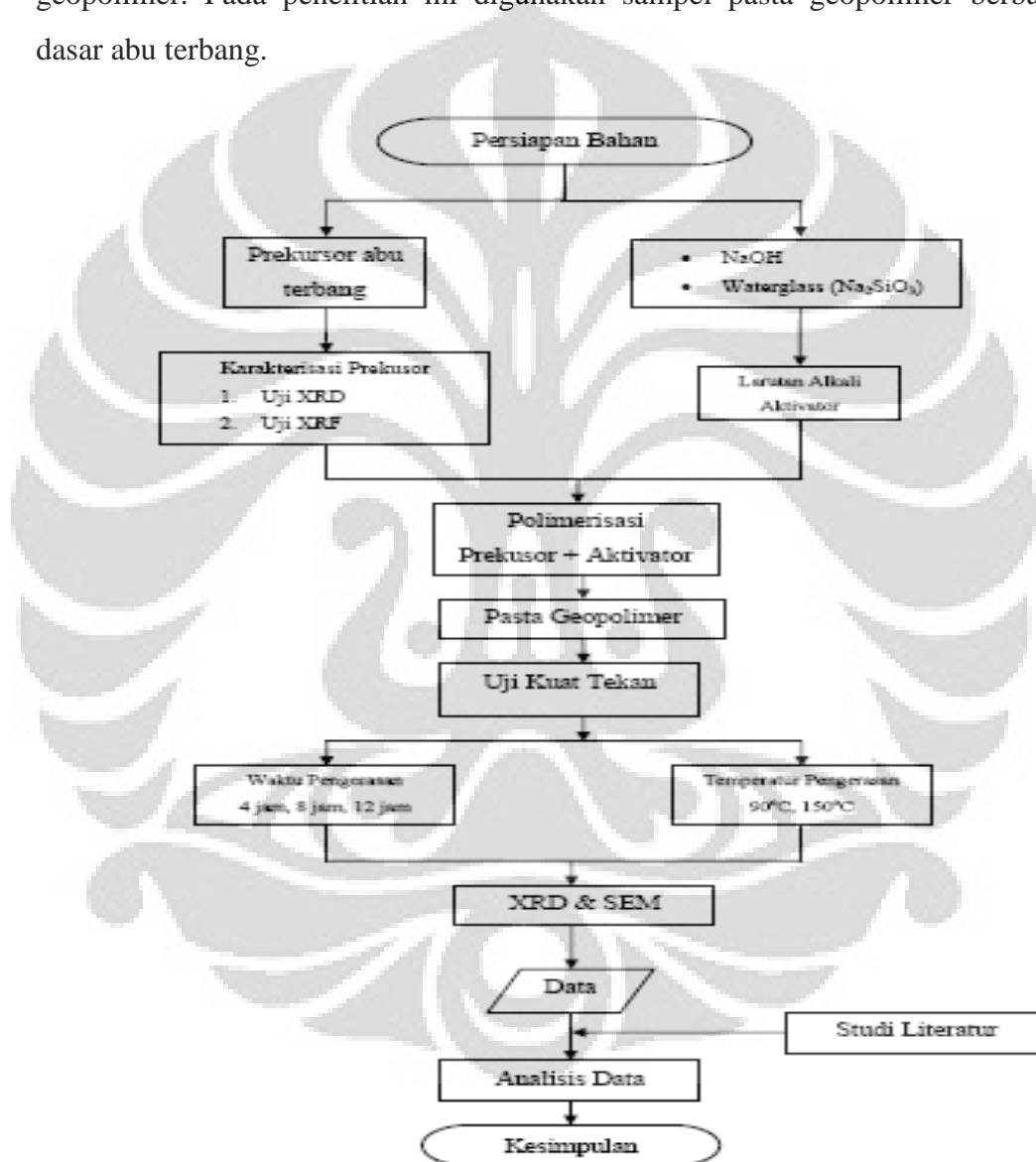


Tidak seperti semen Portland/*pozzolanic* biasa, geopolimer tidak membentuk *calcium-silicate-hydrates* (CSHs) dalam pembentukan matriks, tetapi merupakan hasil proses polikondensasi dari prekursor silika dan alumina serta kandungan alkali yang tinggi untuk mencapai kekuatan yang tinggi.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Berikut ini pada Gambar 3.1, diilustrasikan diagram alir yang menggambarkan secara umum kegiatan yang dilakukan sebagai penelitian mengenai pengaruh temperatur dan waktu *curing* terhadap kuat tekan pasta geopolimer. Pada penelitian ini digunakan sampel pasta geopolimer berbahan dasar abu terbang.



Gambar 0.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan membuat sampel yang berupa adonan pasta semen yang nantinya akan berbentuk kubus dengan dimensi 5 cm x 5 cm x 5 cm dengan cara dituang ke dalam cetakan dan dipanaskan di dalam oven. Pengujian yang dilakukan ialah pengujian kuat tekan berdasarkan standar ASTM C 109 terhadap pasta semen setelah mengalami proses *curing* sesuai parameter yang telah ditentukan. Sampel pasta geopolimer akan diuji tekan dengan 3 sampel tiap parameter suhu dan waktu *curing*. Total sampel untuk uji tekan kubus ini sebanyak 18 sampel. Pengamatan yang dilihat berupa hasil pengujian kuat tekan dari setiap sampel dengan parameter temperatur dan waktu *curing*. Total sampel uji pada penelitian ini secara lengkap dapat dilihat pada tabel 3.1 dibawah ini :

Tabel 3.1 Jumlah sampel uji

Parameter		Jumlah Sampel
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Waktu (jam)	
90 $^{\circ}\text{C}$	4	3
	8	3
	24	3
150 $^{\circ}\text{C}$	4	3
	8	3
	24	3
Total sampel		18

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Alat

1. Mixer

Gambar 3.2 menunjukkan mixer yang digunakan yang terdapat pada laboratorium struktur dan material Departemen Sipil FTUI. Alat ini digunakan untuk mencampur bahan pembuat larutan alkali aktivator dan pembuatan pasta geopolimer.

Terdiri dari suatu wadah untuk menampung bahan – bahan yang akan dicampur dan sebuah sendok besar yang berputar yang berfungsi untuk mengaduk bahan campuran tersebut. Alat ini dapat bekerja dengan bantuan energi listrik.



Gambar 3.2 Mixer

2. Cetakan pasta

Untuk menghasilkan pasta geopolimer maka digunakan suatu cetakan yang terdapat pada laboratorium struktur dan material Departemen Sipil FTUI. Cetakan ini memiliki 2 jenis yaitu cetakan yang berisi 6 kubus sedangkan cetakan lainnya terdiri dari 3 kubus.



gambar 3.3 (a) Cetakan pasta tiga kubus (b) Cetakan pasta enam kubus

3. Plastik

Plastik digunakan untuk menutupi pasta yang sudah dicor ke dalam cetakan agar tidak terjadi penguapan berlebihan saat dilakukan proses *curing* dalam oven.



Gambar 3.4 Plastik

4. Timbangan *digital*

Terdapat 2 jenis timbangan yang digunakan yaitu timbangan digital yang terdapat pada laboratorium metalografi Departemen Metalurgi & Material FTUI dengan tingkat kepresisian hingga dua angka dibelakang koma yang digunakan untuk menimbang bahan – bahan yang akan dipakai dalam penelitian ini dan timbangan digital yang terdapat pada laboratorium struktur dan material Departemen Sipil FTUI yang digunakan untuk menimbang produk pasta geopolimer yang telah dikeluarkan dari cetakan setelah mengalami proses *curing*.



(a)



(b)

Gambar 3.5 (a) Timbangan *digital* lab metalografi

(b) Timbangan *digital* lab struktur dan material

5. Wadah plastik anti panas

Wadah ini berbentuk kotak berwarna putih yang didesain secara khusus untuk aplikasi tahan panas dalam *microwave*. Dalam penelitian ini wadah tersebut digunakan untuk menguji komposisi pasta geopolimer yang akan digunakan apakah bisa mengeras atau tidak sebelum digunakan untuk membuat pasta geopolimer yang sebenarnya.



Gambar 3.6 Wadah plastik anti panas

6. Oven

Digunakan dua jenis oven dalam penelitian ini yaitu oven tipe Carbolite rhf 1600 yang terdapat pada laboratorium teknik pengubahan bentuk logam Departemen Metalurgi & Material FTUI yang digunakan dalam *trial & error* dalam menentukan komposisi pasta yang ideal yang akan dijadikan pasta geopolimer.



Gambar 3.7 (a) Oven Carbolite rhf 1600

Tipe oven Fuji electric PXR – 4 berwarna kuning yang terdapat pada laboratorium struktur dan material Departemen Sipil FTUI digunakan dalam proses *curing* pasta geopolimer.



Gambar 3.7 (b) Oven Fuji electric PXR - 4

7. *Thermocouple*

Thermocouple digunakan untuk mengukur temperatur aktual yang terjadi di dalam oven dengan cara memasukan kawat *thermocouple* ke dalam oven maka *thermocouple* akan menampilkan suatu angka yang menunjukkan temperatur aktual yang ada di dalam oven.



Gambar 3.8 *thermocouple*

8. Mesin uji kuat tekan

Alat ini terdapat laboratorium struktur dan material Departemen Sipil FTUI yang digunakan untuk menguji kekuatan tekan dari pasta geopolimer yang dihasilkan.



Gambar 3.9 Mesin uji kuat tekan

9. Lilin

Lilin digunakan untuk menambal cetakan yang bocor saat terjadi kebocoran pada proses pengecoran pasta ke dalam cetakan.

Bahan

1. Prekursor

Prekursor yang digunakan ialah abu terbang (*fly ash*) yang merupakan limbah proses pembakaran batu bara PLTU Suralaya.



Gambar 3.10 Abu terbang

2. Larutan alkali aktivator

Untuk membuat larutan alkali aktivator digunakan natrium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH) yang bersifat PA (*pure analyse*) yang dapat dibeli di toko kimia dengan spesifikasi sebagai berikut :

Na_2SiO_3 :

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

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

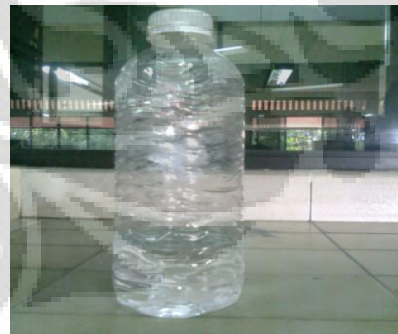
Density (20°C) = 1,296 – 1,390 gram/ml

NaOH :

M = 40 gram/mol

Acidimetric, $\text{NaOH} \geq 99 \%$

Carbonate (Na_2CO_3) $\leq 1 \%$



Gambar 3.11 (a) natrium hidroksida (b) Natrium silikat

3. Aquades

Aquades yang digunakan ialah aquades yang tersedia pada Departemen Metalurgi & Material FTUI.

3.3 Komposisi

Dalam menentukan mix desain campuran pasta geopolimer sebelumnya harus mengetahui komposisi yang tepat dari material geopolimer. Komposisi perbandingan antara prekursor dan aktivator harus ditentukan agar mendapatkan campuran yang terbaik untuk mendapatkan kuat tekan yang maksimal. Untuk menentukan komposisi yang akan digunakan dalam membuat pasta geopolimer maka dilakukan *trial and error* terlebih dahulu untuk mendapatkan komposisi yang terbaik. Variasi dari perbandingan persentase berat ke empat bahan penyusun tersebut merupakan faktor yang diteliti untuk mendapatkan hasil yang optimum dalam penelitian ini. Penilaian utama suatu sampel dianggap mendekati optimum dalam penelitian ini adalah berdasarkan nilai kuat tekannya yang dianggap sangat relevan dengan *workability*. Dilakukan 5 kali proses *trial and error* sebelum akhirnya ditentukan satu komposisi terbaik.

Komposisi yang digunakan dalam penelitian ini tidak dapat ditampilkan terkait dengan hak atas kekayaan intelektual (HAKI). Berdasarkan yang *trial and error* telah dilakukan maka dipilih suatu komposisi yang akan dijadikan komposisi dalam penelitian karena dapat mengeras pada temperatur 90⁰C selama 4 jam dan memiliki viskositas yang baik seperti susu kental yang biasa dikemas dalam kaleng.

3.4 Karakterisasi Prekursor

(1) Pengujian XRD

Pengujian XRD melalui teknik *Wide Angle X-ray Scattering* (WAXS) digunakan untuk mengetahui tingkat kristalinitas dan identifikasi fasa secara kualitatif dari sampel. Pada penelitian ini, pengujian ini berguna untuk mengetahui apakah abu terbang yang digunakan kristalin atau amorf.

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*.

(2) Pengujian XRF

Pengujian ini dilakukan di Program Studi Ilmu Material Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Salemba. X-Ray Fluorescence (XRF) digunakan untuk mengetahui komposisi kimia dari suatu material. Analisis unsur kimia terhadap sampel akan lebih teliti bila dilakukan dengan pengujian XRF. XRF dapat menganalisa senyawa apa saja yang membangun prekursor yang akan digunakan. Analisis XRF hanya efektif untuk unsur dengan berat molekul tinggi tetapi kurang akurat untuk unsur dengan berat molekul lebih ringan dari kalsium. Selain itu, kelemahan lain dari XRF adalah tidak dapat menentukan struktur dari atom yang membentuk material itu.

Proses kerja XRF ialah apabila terjadi eksitasi sinar-X primer yang berasal dari tabung X-ray atau sumber radioaktif mengenai sampel, sinar-X dapat diabsorpsi atau dihamburkan oleh material. Proses dimana sinar-X diabsorpsi oleh atom dengan mentransfer energinya pada elektron yang terdapat pada kulit yang lebih dalam disebut efek fotolistrik. Selama proses ini, bila sinar-X primer memiliki cukup energi, elektron pindah dari kulit yang di dalam menimbulkan kekosongan. Kekosongan ini menghasilkan keadaan atom yang tidak stabil. Apabila atom kembali pada keadaan stabil, elektron dari kulit luar pindah ke kulit yang lebih dalam dan proses ini menghasilkan energi sinar-X yang tertentu dan berbeda antara dua energi ikatan pada kulit tersebut. Emisi sinar-X dihasilkan dari proses yang disebut *X-Ray Fluorescence* (XRF). Proses deteksi dan analisa emisi sinar-X disebut analisa XRF. Pada umumnya kulit K dan L terlibat pada deteksi XRF. Jenis spektrum X ray dari sampel yang diradiasi akan menggambarkan puncak-puncak pada intensitas yang berbeda.

3.5 Persiapan Penelitian

Persiapan cetakan yang akan digunakan untuk mencetak pasta dilakukan dengan membersihkan seluruh bagian dalam permukaan cetakan yang akan bersentuhan secara langsung dengan bahan pembuat pasta dari debu dan pengotor lainnya. Setelah cetakan bersih maka seluruh bagian dalam permukaan cetakan dilapisi dengan plastik yang berasal dari solatip bening agar produk pasta yang dihasilkan tidak menempel pada permukaan cetakan dan mudah dikeluarkan dari cetakan.

Oven yang akan dipakai perlu diperiksa terlebih dahulu sebelum digunakan untuk memastikan bahwa oven yang akan digunakan masih dapat berfungsi dengan baik. Caranya dengan menyalakan oven terlebih dahulu pada temperatur yang ingin digunakan lalu dibiarkan selama 1 jam dan diamati apakah oven dapat stabil pada temperatur yang ditentukan. Bila oven stabil pada temperatur yang ditentukan atau mengalami naik turun temperatur yang tidak besar maka dapat dikatakan bahwa oven dalam keadaan baik dan siap digunakan.

3.6 Pembuatan Pasta Geopolimer

Pasta geopolimer dibuat dari campuran antara larutan alkali aktivator dengan prekursor. Larutan alkali aktivator dibuat dengan mencampurkan natrium silikat yang berwujud cair dan natrium hidroksida yang berbentuk pellet. Setelah dicampur maka akan terjadi kenaikan suhu yang menandakan natrium silikat dan natrium hidroksida telah bereaksi. Proses pencampuran/*mixing* dilakukan di dalam sebuah mixer yang dilengkapi sendok yang berputar yang berfungsi mengaduk bahan pembuat larutan alkali aktivator. Setelah itu ditambahkan aquades ke dalam campuran natrium silikat dan natrium hidroksida sambil terus diaduk. Setelah proses *mixing* menghasilkan larutan alkali aktivator yang homogen maka larutan tersebut dibiarkan hingga temperaturnya turun menjadi temperatur ruang.

Setelah temperatur larutan turun hingga mencapai temperatur ruang maka abu terbang dicampur dengan larutan alkali aktivator dengan menuangkan abu terbang tersebut ke dalam wadah mixer. Campuran antara abu terbang dengan larutan alkali aktivator lalu diaduk dalam mixer hingga terbentuk campuran yang homogen. Campuran yang dihasilkan memiliki tingkat kekentalan (viskositas) mirip seperti susu kental yang biasa dikemas dalam kaleng.

Proses selanjutnya ialah menuangkan adonan pasta pada cetakan yang sebelumnya telah dilapisi dengan solatip hingga adonan pasta memenuhi setiap blok cetakan. Hal yang harus diamati saat penuangan adonan adalah *workability* adonan yaitu kemampuan adonan dalam mengalir mengisi ruang cetakan. Jika *workability* adonan baik maka adonan langsung dapat ditutup dengan lapisan plastik untuk mencegah penguapan air yang berlebihan, sedangkan untuk adonan dengan *workability* rendah harus dibantu dengan kompaksi manual terlebih dahulu agar dapat mengisi ruang cetakan. Cetakan yang digunakan berbentuk kubus dengan dimensi 5cm x 5cm x 5cm. Jika terjadi kebocoran cetakan yang ditandai dengan keluarnya adonan pasta dari samping atau bawah cetakan maka perlu dilakukan reparasi cetakan yaitu dengan menempelkan lilin pada bagian cetakan yang mengalami kebocoran. Kebocoran ini dapat terjadi karena proses pemasangan bagian cetakan yang kurang sempurna atau proses pemasangan kunci cetakan yang kurang baik.

Setelah adonan berada dalam cetakan maka adonan pasta ditutup dengan plastik agar tidak terjadi penguapan aquades selama proses *curing*. Dalam memastikan agar plastik yang digunakan untuk menutup adonan yang berada dalam cetakan berfungsi dengan baik tanpa terlepas maka bagian luar cetakan diberi lakban yang mengelilingi cetakan.

3.7 Pengujian Kuat Tekan

Pembukaan cetakan dilakukan setelah 4, 8, 24 jam proses *curing* pada temperatur 90⁰ dan 150⁰ C. Pasta yang telah dikeluarkan dari cetakan akan diuji kekuatan tekannya dengan mesin uji kuat tekan sesuai standar ASTM C 109. Pasta yang telah dikeluarkan dari oven ditimbang terlebih dahulu beratnya dengan menggunakan timbangan *digital* yang terdapat pada laboratorium struktur dan material Departemen Sipil FTUI sebelum dilakukan uji tekan. Agar didapatkan hasil yang baik maka tiap pasta yang diuji tekan harus memiliki jeda waktu yang sama pada saat proses pengeluaran dari cetakan hingga diuji tekan. Seluruh pasta yang diuji tekan pada selang waktu 7 menit setelah dikeluarkan dari oven. 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 (Fmax) yang mampu diterima benda uji sebelum mengalami kegagalan. Kuat tekan dipengaruhi oleh luas permukaan yang dikenai oleh beban. Tujuan menguji kuat tekan pasta geopolimer ini untuk mendapatkan kuat tekan nominal dengan waktu keras tersingkat. Nilai kuat tekan (σ) didapat berdasarkan persamaan:

$$\sigma = 0,098F/A$$

dimana :

σ = kuat tekan (Mpa)

F = beban maksimum (kg)

A = luas permukaan sampel (cm²)

3.8 Pengamatan SEM

Teknik SEM pada hakekatnya merupakan pemeriksaan dan analisis permukaan. Data atau tampilan yang diperoleh adalah data dari permukaan atau dari lapisan yang tebalnya sekitar 20 μm dari permukaan. Gambar permukaan yang diperoleh merupakan gambar topografi dengan segala tonjolan dan lekukan permukaan. Gambar topografi diperoleh dari penangkapan pengolahan elektron sekunder yang dipancarkan oleh spesimen. Prinsip kerja SEM adalah *scanning* yang berarti bahwa berkas elektron “menyapu” permukaan spesimen, titik demi titik dengan sapuan membentuk garis demi garis, mirip seperti gerakan mata yang membaca. Sinyal elektron sekunder yang dihasilkannya adalah dari titik pada permukaan, yang selanjutnya ditangkap oleh detektor *secondary electron* dan kemudian diolah dan ditampilkan pada layar CRT. *Scanning coil* yang mengarahkan berkas elektron bekerja secara sinkron dengan pengarah berkas elektron pada tabung layar TV, sehingga didapatkan gambar permukaan spesimen pada layar CRT.

Permukaan spesimen harus bersifat konduktif. Oleh karena itu permukaan spesimen memerlukan proses *coating* atau pelapisan dengan karbon atau emas paladium terlebih dahulu. Adanya material yang tidak konduktif, misalnya serat kertas atau kotoran di permukaan spesimen akan menyebabkan terjadinya efek *charging* yang kelihatan berwarna sangat terang pada gambar SEM. Oleh karena itu permukaan spesimen harus bersih dari kotoran dan tidak terkontaminasi oleh keringat. Pengamatan ini menggunakan SEM-EDX LEO 420i di Departemen Metalurgi & Material FTUI.

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Prekursor

Abu terbang sebagai bahan dasar (prekursor) pembentuk geopolimer diuji dengan uji XRF (*X - Ray Fluorescent*). Seperti dijelaskan pada sub bab 3.4, uji XRF untuk mengetahui komposisi kimia penyusun abu terbang. Kandungan abu terbang yang dapat mempengaruhi sifat-sifat geopolimer. Abu terbang yang digunakan berasal dari PLTU suralaya. Pengujian XRF dilakukan di laboratorium Material Science FMIPA Universitas Indonesia Salemba. Komposisi kimia abu terbang terdapat pada tabel berikut:

Tabel 4.1 Komposisi kimia abu terbang hasil uji XRF

Chemical Formula	Wt. (%)
Al ₂ O ₃	4.5523
SiO ₂	40.6029
S	0.8019
K ₂ O	3.5263
CaO	16.4963
TiO ₂	2.1928
MnO ₂	1.7687
Fe ₂ O ₃	29.8185
ZrO ₂	0.2403

Dari hasil uji XRF dapat dilihat bahwa abu terbang yang digunakan memiliki kandungan silika yang cukup tinggi. ASTM C618 menggolongkan abu terbang menjadi dua kelas berdasarkan kandungan kapur (CaO) menjadi kelas F yaitu dengan kandungan CaO kurang dari 10% dan kelas C dimana kandungan CaO lebih dari 10%. Dalam penelitian ini abu terbang yang digunakan termasuk dalam ASTM C618 kelas C dengan kandungan CaO sekitar 16%.

4.2 Komposisi Pasta Geopolimer

Sintesis geopolimer dilakukan dengan membuat sampel dimana komposisi pasta geopolimer merupakan suatu perbandingan dari bahan penyusunnya yaitu abu terbang, natrium hidroksida, natrium silikat, dan air. Untuk memperoleh campuran yang baik digunakan rasio atom $Al/Na = 1$. Dengan mengetahui komposisi kimia suatu penyusun beserta informasi kandungan kemurniannya, massa atom, dan massa molekul, maka persentase berat atom dalam penyusun dapat dihitung secara empiris dengan metode perbandingan rasio molar. Persentase atom silikon merupakan penjumlahan antara silikon yang terkandung dalam abu terbang dan natrium silikat sama halnya dengan persentase atom natrium yang merupakan penjumlahan antara natrium yang terkandung dalam natrium silikat dan natrium hidroksida, sedangkan untuk atom aluminium dan kalsium hanya terkandung dalam abu terbang.

Dengan mengkonversi perbandingan atom $Al/Na = 1$ ke dalam berat penyusun maka didapatkan suatu komposisi sampel geopolimer. Dalam prakteknya komposisi tersebut tidak serta merta menghasilkan sampel yang baik, sehingga perlu dilakukan *trial and error* untuk menyempurnakan komposisi berdasarkan perhitungan stoikiometri tersebut guna mendapatkan hasil yang optimum. Adapun parameter yang digunakan dalam penyempurnaan komposisi pasta geopolimer ialah berdasarkan observasi di laboratorium seperti mampu tuang (*workability*) yang baik. Parameter ini diamati ketika proses pencampuran bahan secara visual.

4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Hasil uji tekan dari laboratorium untuk pasta geopolimer dilakukan pada saat pasta geopolimer diberi perlakuan *curing* selama 4 jam, 8 jam, 24 jam pada temperatur *curing* 90⁰C, 150⁰C. *Curing* yang dimaksud pada penelitian ini adalah proses pengerasan pasta geopolimer. Proses *curing* suhu dilakukan dengan oven yang terdapat di laboratorium struktur dan material Departemen Teknik Sipil. Data yang diperoleh dari mesin uji adalah beban maksimum yang mampu diterima benda uji sebelum mengalami kegagalan.

Tabel 4.2 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer pada temperatur *curing* 90⁰C

Temperatur <i>curing</i> 90 ⁰ C				
Waktu <i>curing</i> 4 jam				
Sampel	Massa (gram)	F (kg)	A (cm ²)	σ (MPa)
1	234	6100	25	23,91
2	233	7000	25	27,44
3	234	7100	25	27,83
Rata - rata				26,39
Waktu <i>curing</i> 8 jam				
Sampel	Massa (gram)	F (kg)	A (cm ²)	σ (MPa)
1	241	10400	25	40,76
2	238	8900	25	34,88
3	247	7200	25	28,22
Rata - rata				34,62
Waktu <i>curing</i> 24 jam				
Sampel	Massa (gram)	F (kg)	A (cm ²)	σ (MPa)
1	238	11000	25	43,12
2	235	11500	25	45,08
3	240	11000	25	43,12
Rata - rata				43,77

Pada tabel 4.2 diperoleh hasil kuat tekan dari pasta geopolimer yang dihasilkan pada temperatur *curing* 90⁰C dengan sampel no 2 mencapai kekuatan tertinggi dengan 45,08 Mpa pada waktu curing selama 24 jam. Kekuatan tekan rata – rata yang dihasilkan pada waktu 24 jam ialah 43,77 Mpa. Hasil ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan dua varibel waktu yang lain yaitu pada 4 jam mencapai 26,39 MPa dan pada 8 jam mencapai 34,62 MPa. Gambar 4.1 dibawah ini merupakan contoh hasil dari pasta yang dihasilkan pada temperatur *curing* 90⁰C selama 24 jam.



Gambar 4.1 Pasta geopolimer pada temperatur *curing* 90⁰C selama 24 jam

Tabel 4.3 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer pada temperatur *curing* 150°C

Temperatur <i>curing</i> 150°C				
Waktu <i>curing</i> 4 jam				
Sampel	Massa (gram)	F (kg)	A (cm ²)	σ (MPa)
1	218	9750	25	38,22
2	213	10250	25	40,18
3	219	10300	25	40,37
Rata - rata				39,59
Waktu <i>curing</i> 8 jam				
Sampel	Massa (gram)	F (kg)	A (cm ²)	σ (MPa)
1	212	10500	25	41,16
2	211	11000	25	43,12
3	213	14000	25	54,88
Rata - rata				46,38
Waktu <i>curing</i> 24 jam				
Sampel	Massa (gram)	F (kg)	A (cm ²)	σ (MPa)
1	200	5000	25	19,6
2	200	5500	25	21,56
3	205	11000	25	43,12
Rata - rata				28,09

Pada tabel 4.3 diperoleh hasil kuat tekan dari pasta geopolimer yang dihasilkan pada temperatur *curing* 150°C dengan sampel no 3 mencapai kekuatan tertinggi dengan 54,88 Mpa pada waktu *curing* selama 8 jam. Kekuatan tekan rata – rata yang dihasilkan pada waktu 8 jam ialah 46,38 Mpa. Hasil ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan dua variabel waktu yang lain yaitu pada 4 jam mencapai 39,59 MPa dan pada 24 jam mencapai 28,09 MPa. Gambar 4.2 dibawah ini merupakan contoh hasil dari pasta yang dihasilkan pada temperatur *curing* 150°C selama 24 jam.

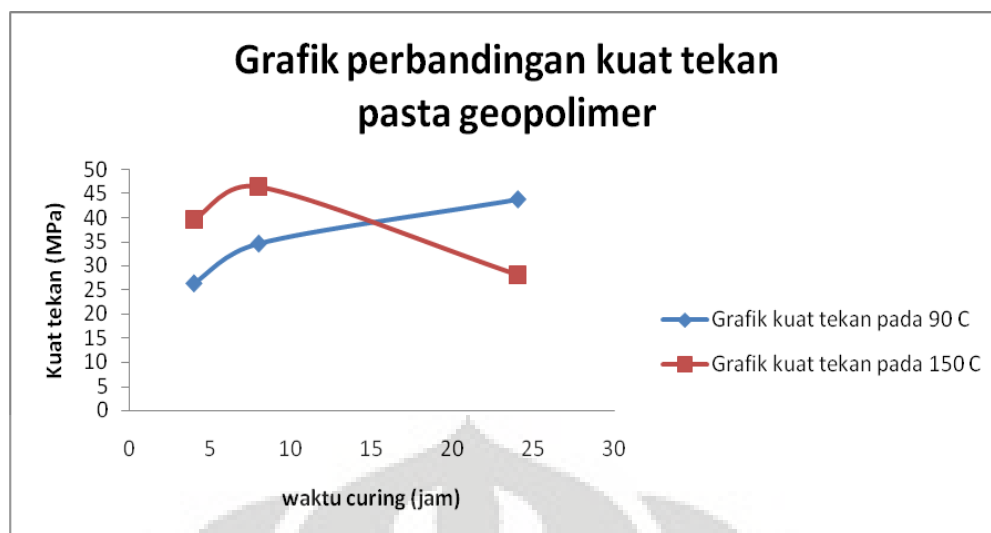


Gambar 4.2 Pasta geopolimer pada temperatur *curing* 150⁰C selama 24 jam

4.4 Analisa Pengujian Kuat Tekan

Berdasarkan penjelasan pada bab 2 kenaikan kuat tekan beton geopolimer dapat dipengaruhi oleh suhu dan waktu *curing*. Semakin tinggi suhu *curing* dan semakin lama waktu *curing* maka kuat tekan akan semakin besar. Pada penelitian ini hasil kuat tekan dari pasta geopolimer menunjukkan hal yang serupa. Pada temperatur *curing* 90⁰ C selama 24 jam kuat tekan pasta geopolimer lebih tinggi dibandingkan suhu ruang *curing* 90⁰ C selama 4 dan 8 jam.

Demikian pula yang terjadi pada *curing* 150⁰C. Terjadi peningkatan kekuatan tekan dari waktu *curing* 4 jam ke 8 jam, namun mengalami penurunan pada waktu *curing* 24 jam. Hal ini terjadi karena permukaan pasta yang tidak rata seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.2 karena penggunaan cetakan yang berbeda. Berdasarkan data-data uji kuat tekan pasta dapat dilihat pada grafik gambar 4.3.



gambar 4.3 Grafik perbandingan kuat tekan pasta geopolimer

Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa waktu dan temperatur *curing* dapat mempengaruhi kuat tekan dari pasta geopolimer. Pada temperatur 90⁰ C dapat dilihat adanya kenaikan kekuatan tekan. Pada waktu 4 jam menghasilkan kuat tekan sebesar 26,39 MPa, 8 jam sebesar 34,62 MPa, 24 jam sebesar 43,77 MPa. Hal ini terjadi karena semakin lama waktu dari peng-*curing*-an maka akan semakin meningkat kuat tekan pasta tersebut dalam temperatur *curing* yang sama. Pada periode *curing* yang lebih lama maka reaksi polimerisasi yang terjadi akan makin sempurna sehingga menghasilkan ikatan kimia yang lebih sempurna yang menyebabkan kekuatannya meningkat. Dapat dikatakan bahwa reaksi polimerisasi terus berlangsung hingga 24 jam. Berdasarkan penelitian ini dapat dibuktikan bahwa lamanya waktu peng-*curing*-an dengan suhu *curing* yang tetap kuat tekan pasta geopolimer dapat meningkat.

Demikian pula yang terjadi pada temperatur 150°C dapat dilihat adanya kenaikan kekuatan tekan hingga 8 jam namun mengalami penurunan pada 24 jam. Untuk waktu 4 dan 8 jam kekuatan tekannya lebih tinggi dari temperatur *curing* 90°C . Hal ini terjadi karena temperatur *curing* yang makin besar akan meningkatkan kinetika reaksi polimerisasi yang terjadi antara larutan alkali aktivator dengan prekursor sehingga kuat tekan pasta akan lebih besar pada suhu yang lebih tinggi. Makin besar temperatur maka makin besar pula *driving force* atau energi yang diberikan terhadap reaksi yang terjadi. Mekanisme reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut^[25]:

1. Pelarutan atom Si dan Al yang terkandung pada prekursor terhadap larutan alkali aktivator.
2. Reorientasi *cluster* ion bebas.
3. Polikondensasi

Namun tiap tahap yang terjadi dapat terjadi melalui beragam cara. Misalnya tahap disolusi atau pelarutan dapat terjadi melalui 8 cara yang berbeda tergantung dari kesetimbangan termodinamik yang terjadi. Cara yang berbeda tentunya akan menghasilkan pembentukan *cluster* ion bebas yang berbeda pula yang nantinya akan mempengaruhi sifat akhir dari material geopolimer itu sendiri, sehingga penting untuk mengetahui cara yang ditempuh dalam terjadinya disolusi. Hingga saat ini masih belum jelas bagaimana ketiga tahapan tersebut diatas berlangsung karena cepatnya kinetika reaksi yang terjadi bahkan hampir pada saat yang bersamaan sehingga menyebabkan kinetika reaksi yang terjadi menjadi *interdependent*.

Namun pada waktu 24 jam kekuatan tekan yang dihasilkan lebih tinggi pada temperatur 90°C karena adanya perbedaan cetakan yang digunakan. Untuk pasta pada waktu *curing* 24 jam pada temperatur 150°C menggunakan cetakan yang berbeda dengan pasta lainnya yaitu cetakan yang berisi 6 kubus sedangkan pasta pada variabel waktu dan temperatur lainnya menggunakan cetakan pasta yang berisi 3 kubus.

Cetakan yang berisi 6 kubus lebih sulit untuk *dicoating* menggunakan plastik dari pada cetakan yang berisi 3 kubus sehingga permukaan pasta yang dihasilkan menjadi tidak rata. Akibatnya beban yang diberikan oleh mesin uji menjadi tidak homogen ke seluruh permukaan pasta sehingga dihasilkan kekuatan tekan yang rendah. Adapun peralihan cetakan yang digunakan dikarenakan cetakan 3 yang sebelumnya dipakai akan digunakan oleh operator laboratorium struktur dan material Departemen Sipil FTUI untuk mengerjakan tugas/proyek yang sedang dikerjakan pada saat tersebut.

Pasta geopolimer membutuhkan panas untuk bereaksi. Hal ini ditunjukkan dengan kenaikan *heat flow* per massa per satuan waktu yang merupakan reaksi endoterm (menyerap panas) yang diketahui melalui analisis termal dengan metode DSC (*Differential Scanning Calorimetry*)^[26]. Analisa termal merupakan suatu analisa dengan memberikan input kalor untuk mengetahui karakterisasi dari sampel. Teknik analisa termal digunakan untuk mendeteksi perubahan fisika (penguapan) atau kimia (dekomposisi) suatu bahan yang ditunjukkan dengan penyerapan panas (endotermik) dan pengeluaran panas (eksotermik). DSC adalah suatu teknik analisa termal yang mengukur energi yang diserap atau diemisikan oleh sampel sebagai fungsi waktu atau suhu. Ketika transisi termal terjadi pada sampel, DSC memberikan pengukuran kalorimetri dari energi transisi dari temperatur tertentu.

Teknik analisa termal digunakan untuk penentuan kontrol kualitas suatu produk / bahan khususnya polimer. Tanpa adanya pengetahuan data-data termal, pemrosesan suatu bahan akan sangat sulit dilakukan. Sifat termal suatu bahan menggambarkan karakteristik dari bahan tersebut jika dikenakan perlakuan termal (dipanaskan/didinginkan). Dengan demikian pengetahuan tentang sifat termal suatu bahan menjadi sangat penting dalam kaitannya dengan pemrosesan bahan menjadi barang jadi maupun untuk kontrol kualitas. Dengan memahami jenis perubahan struktur yang terjadi, dapat ditentukan langkah proses yang sesuai.

BAB 5

KESIMPULAN

Dari data-data yang diperoleh pada penelitian ini dan analisa yang dilakukan sesuai dengan landasan teori serta penelitian-penelitian sebelumnya maka dapat disimpulkan yaitu:

1. Pasta geopolimer berbahan dasar abu terbang mengalami peningkatan kuat tekan seiring dengan naiknya waktu *curing* pada temperatur *curing* yang sama.
 - Kuat tekan pada temperatur *curing* 90⁰C selama 4 jam adalah 26,39 MPa, selama 8 jam 34,62 MPa, selama 24 jam 43,77 MPa.
 - Kuat tekan pada temperatur *curing* 150⁰C selama 4 jam adalah 39,59 MPa, selama 8 jam 46,38MPa.
2. Pasta geopolimer berbahan dasar abu terbang mengalami peningkatan kuat tekan seiring dengan naiknya temperatur *curing* pada waktu *curing* yang sama.
 - Kuat tekan selama 4 jam pada temperatur 90⁰C ialah 26,39 MPa sedangkan pada pada temperatur 150⁰C 39,59 Mpa.
 - Kuat tekan selama 8 jam pada temperatur 90⁰C ialah 34,62 MPa sedangkan pada pada temperatur 150⁰C 46,38 Mpa.
3. Kuat tekan pasta geopolimer berbahan dasar abu terbang dengan temperatur *curing* 150⁰C memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan pasta geopolimer dengan temperatur *curing* 90⁰C.
4. Reaksi yang terjadi bersifat endotermis.

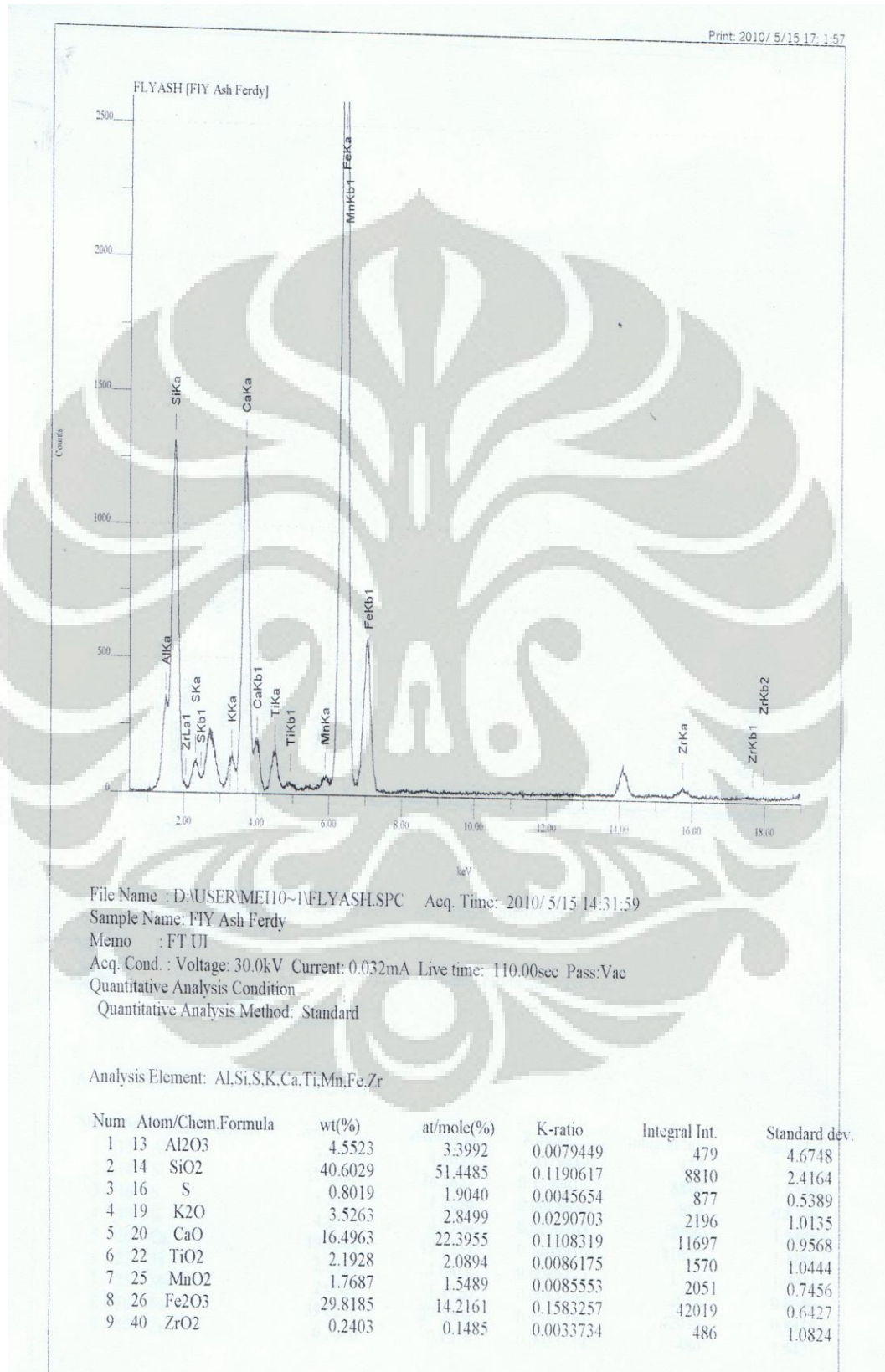
DAFTAR PUSTAKA

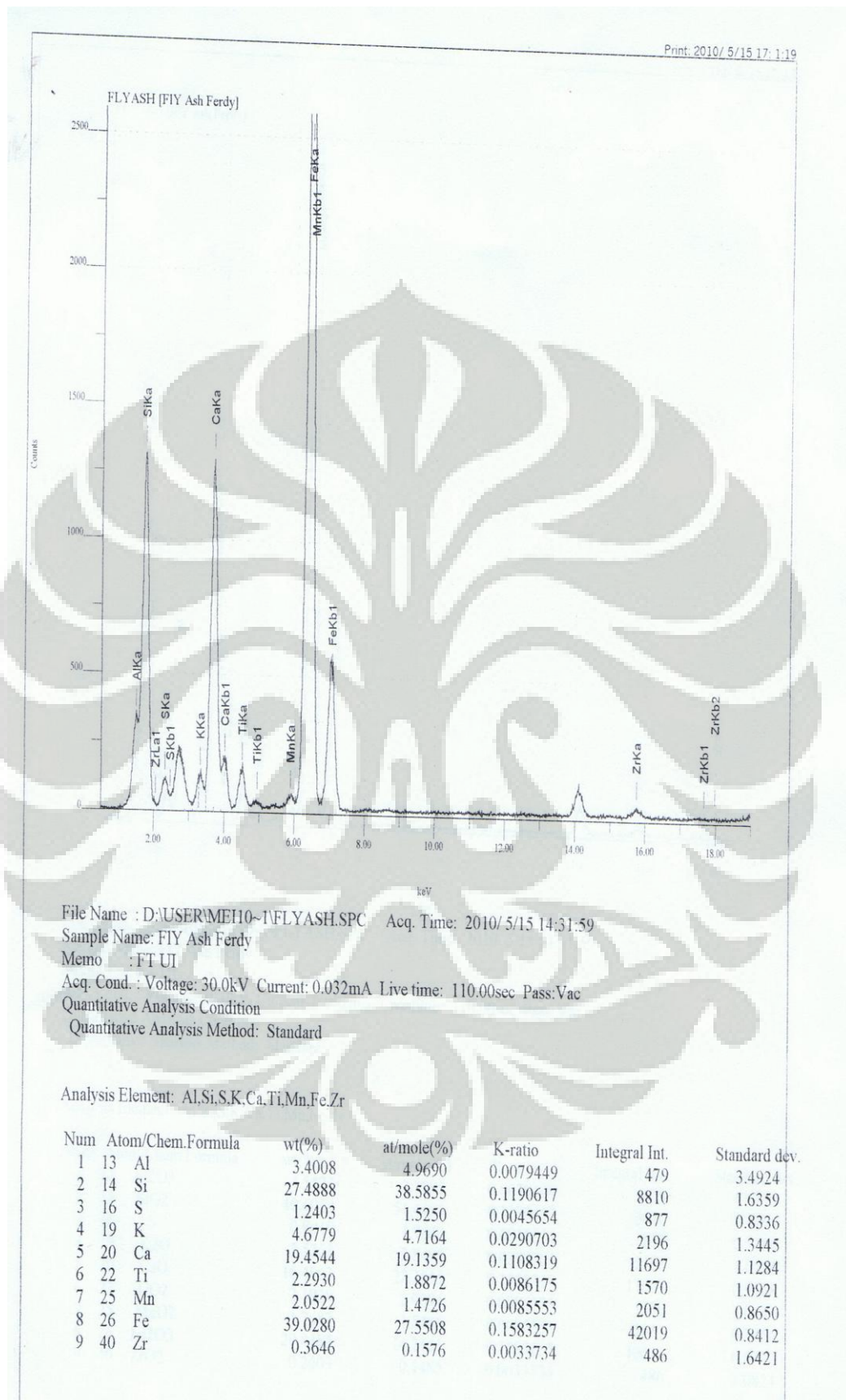
1. Malhotra VM. *Making concrete 'greener' with fly ash*. ACI Concrete. Int. 1999;12(5):61-6.
2. M. Criado, A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, P. F. G. Banfill (2009), *Alkali activated fly ash : effect of admixtures on paste rheology*. Rheol. Acta 48 : 447 – 455.
3. Astutiningsih, Sotya. (2009). *The potentials of geopolymer for rapid-set high strength cement in concrete repair*. International Concrete on Rehabilitation and Maintenance in Civi Engineering, 1, p. 204 – 207.
4. Davidovits, Joseph, *Geopolimer: Chemistry and Application*, Institut Geopolimer, 2008.
5. http://dewey.petra.ac.id/jiunkpe_dg_4125.html (diakses pada 1 April 2010)
6. Dina Noermalasari, 2010. Perilaku korosi pada baja tulangan dalam beton geopolimer abu terbang dalam media aquades dan air laut ASTM. Universitas Indonesia.
7. Davidovits J. Geopolymers of the first generation: SILICAFE-process. *The Geopolymere '88, first European Conference on Soft Mineralogy*. Compiegne, France.
8. Song XJ, Marosszeky, Brungs MM, Mun R. Durability of fly ash-based geopolymer concrete against sulphuric acid attack. *The 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and and Components*. Lyon, France, 2005.
9. Davidovits J. Properties of geopolymer cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes* 1994:131-49.
10. Davidovits, J. *Properties of Geopolymer Cements*. Geopolymer Institute. 1994.
11. Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *J. Thermal Analysis* 1991;(37):1633-56.
12. Frantisek Skvára, Jan Slosar, Jan Bohunek and Alena Marková, *alkali – activated fly ash geopolymeric materials*, (2003).
13. A. Fernández-Jiménez, I. Garcí'a-Lodeiro, A. Palomo (2007), *Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials*. J Mater Sci 42:3055–3065.

14. Managing Coal Combustion Residues in Mines, Committee on Mine Placement of Coal Combustion Wastes, National Research Council of the National Academies, 2006.
15. <http://majarimagazine.com/2008/06/abu-terbang-batubara-sebagai-adsorben> (diakses pada 1 Mei 2010)
16. Putu Astari Merati, Utilization of fly ash from power plant for removal of dyes, (2006).
17. Yoga Pratama, Heri T. Putranto, Coal fly ash conversion to zeolite for removal of chromium and nickel from wastewaters, (2007).
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. <http://thebloghub.com/pages/ABU-BATUBARA> (diakses pada 1 mei 2010)
20. http://dewey.petra.ac.id/jiunkpe_dg_10226.html (diakses pada 1 April 2010).
21. Daniel K., Sanjayan J. and 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.
22. Palomo A, Grutzeck MW, Blanco MT. *Alkali-Activated Fly ashes: A cement for the future*. Cem. Conc. Res. 1999;29(8):1323-9.
23. Hardjito, D., S.E. Wallah, D.M.J. Sumajouw and B.V. Rangan, (2004) *On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, ACI Material Journal, p. 467-472.
24. Hardjito, D., B.V. Rangan, development and properties of low calcium fly ash based geopolymer concrete, (2005).
25. Zongjin Li, Zhu Ding, Yunsheng Zhang, *Development of sustainable cementious material*, pp. 55 – 76.
26. Kamil Afrizal, 2010. Studi Perilaku Kuat Tekan Semen *Rapid-Setting* Geopolimer Berbahan Dasar *Fly ash* dan Metakaolin. Universitas Indonesia.

LAMPIRAN

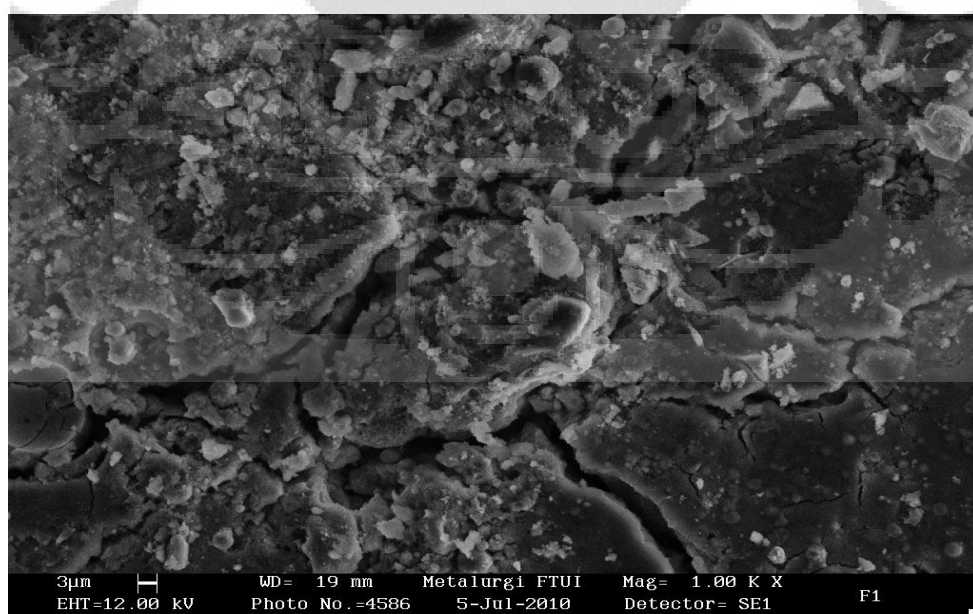
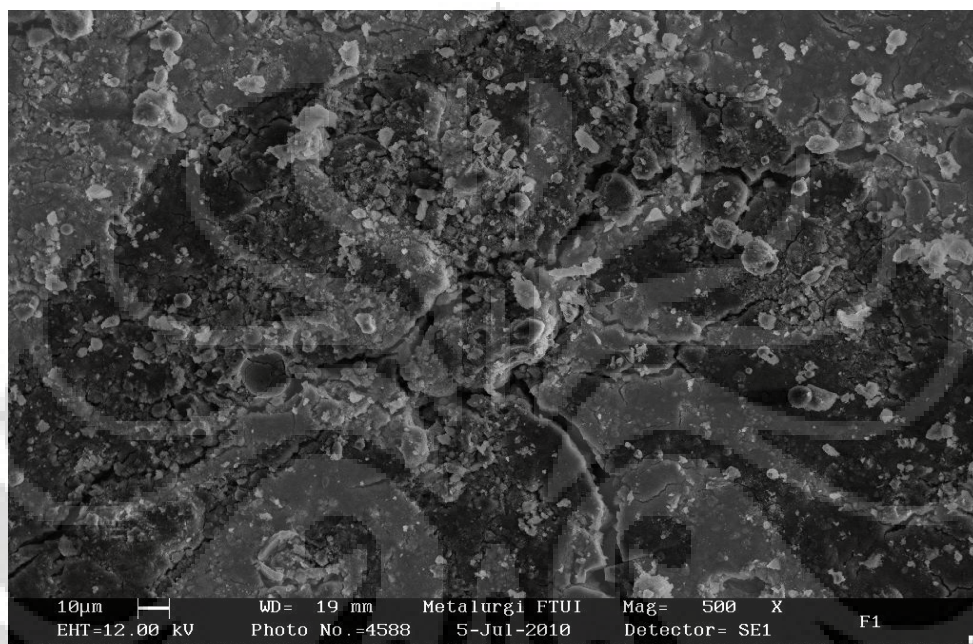
Lampiran A – 1 Hasil uji XRF abu terbang

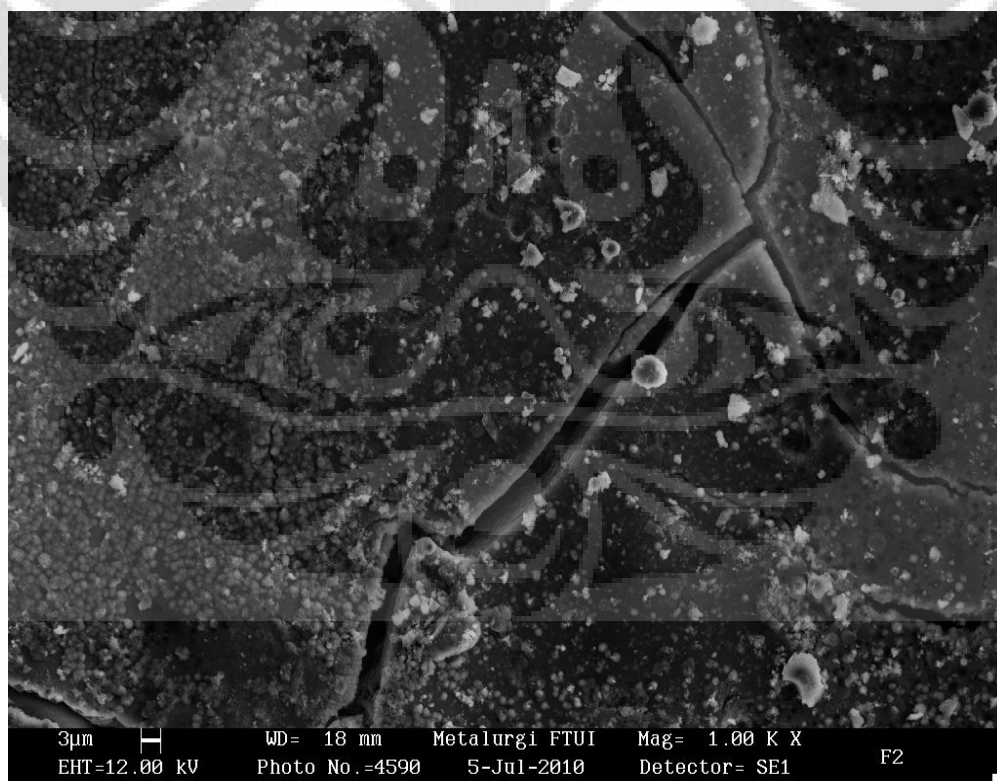
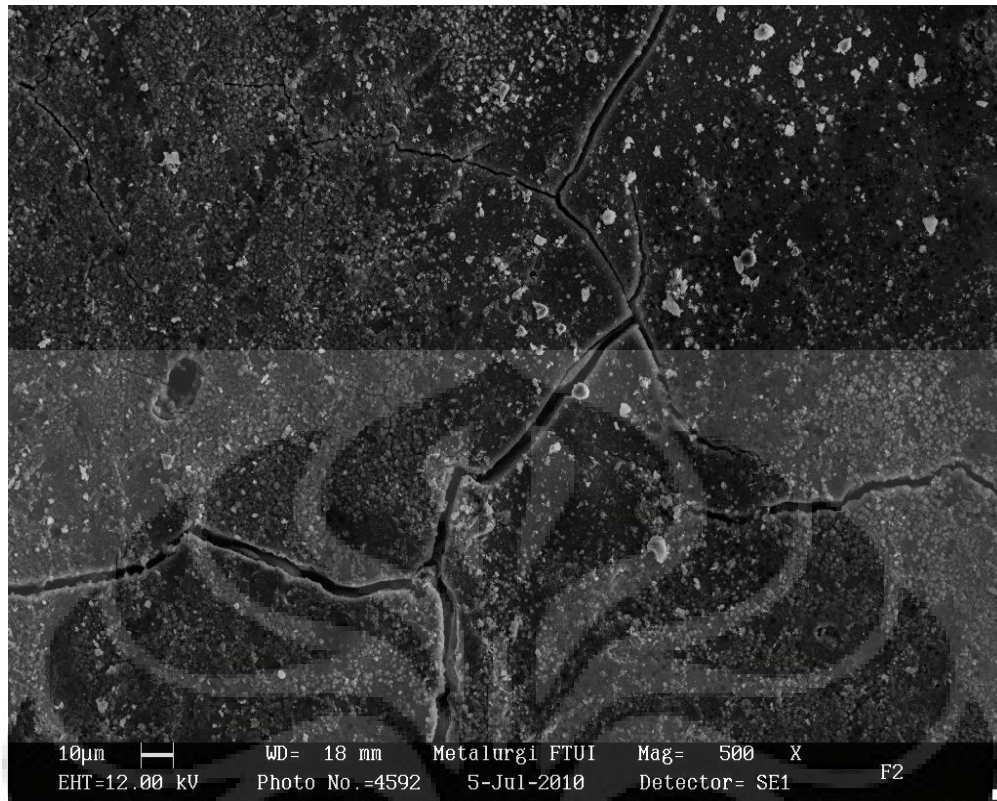


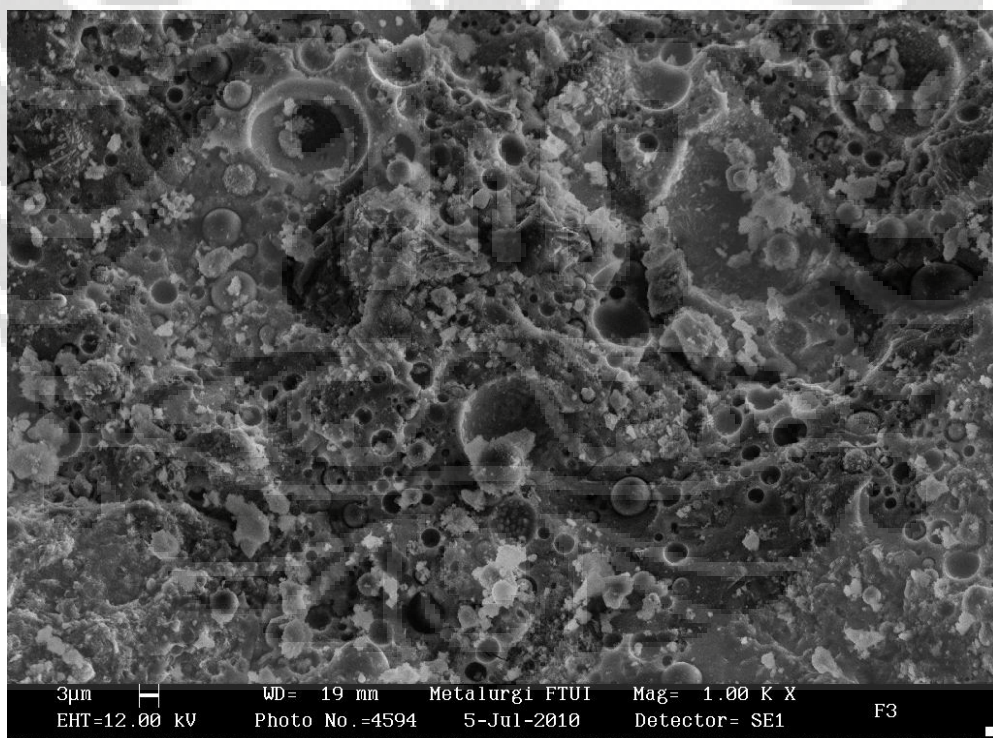
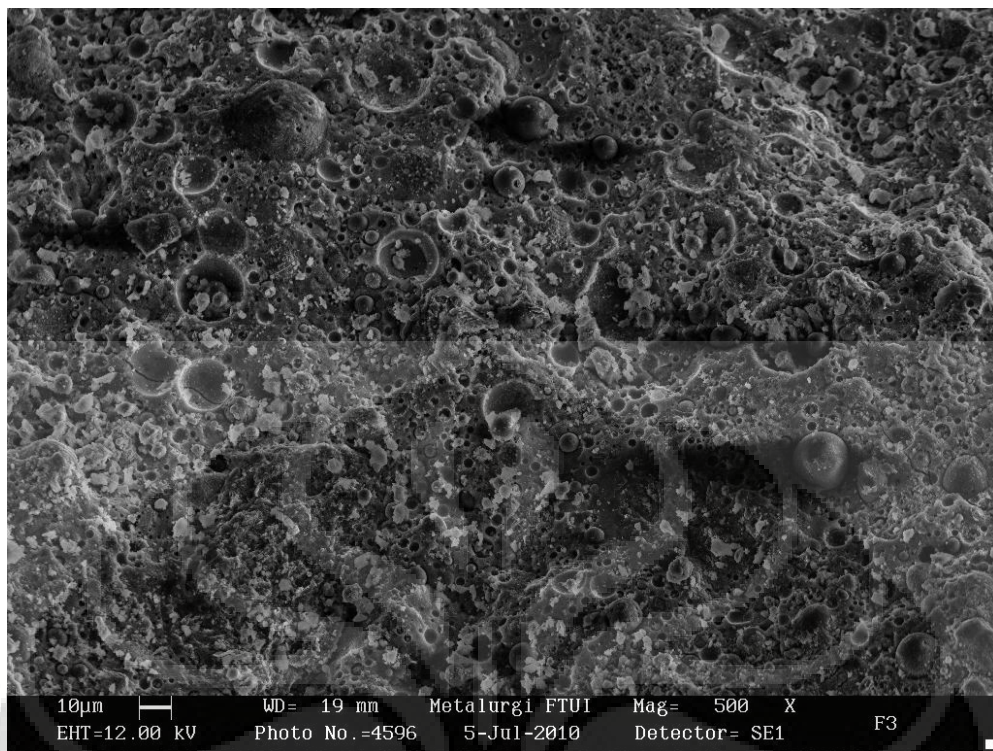


Lampiran A – 2 Hasil foto mikro sampel

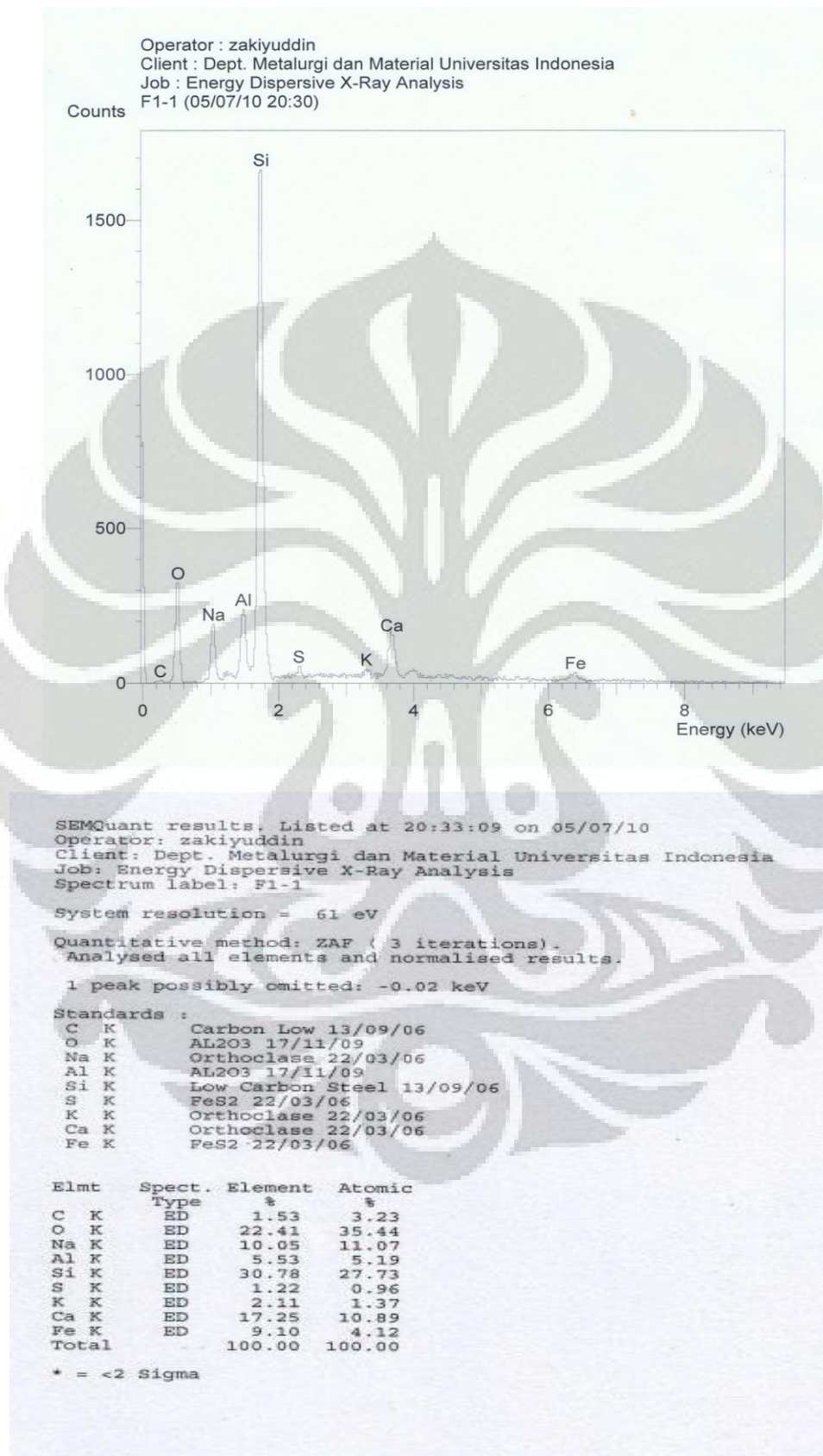
Kode	Temperatur <i>curing</i>	Waktu <i>curing</i>
F1	90 ⁰ C	4 jam
F2	90 ⁰ C	8 jam
F3	90 ⁰ C	24 jam

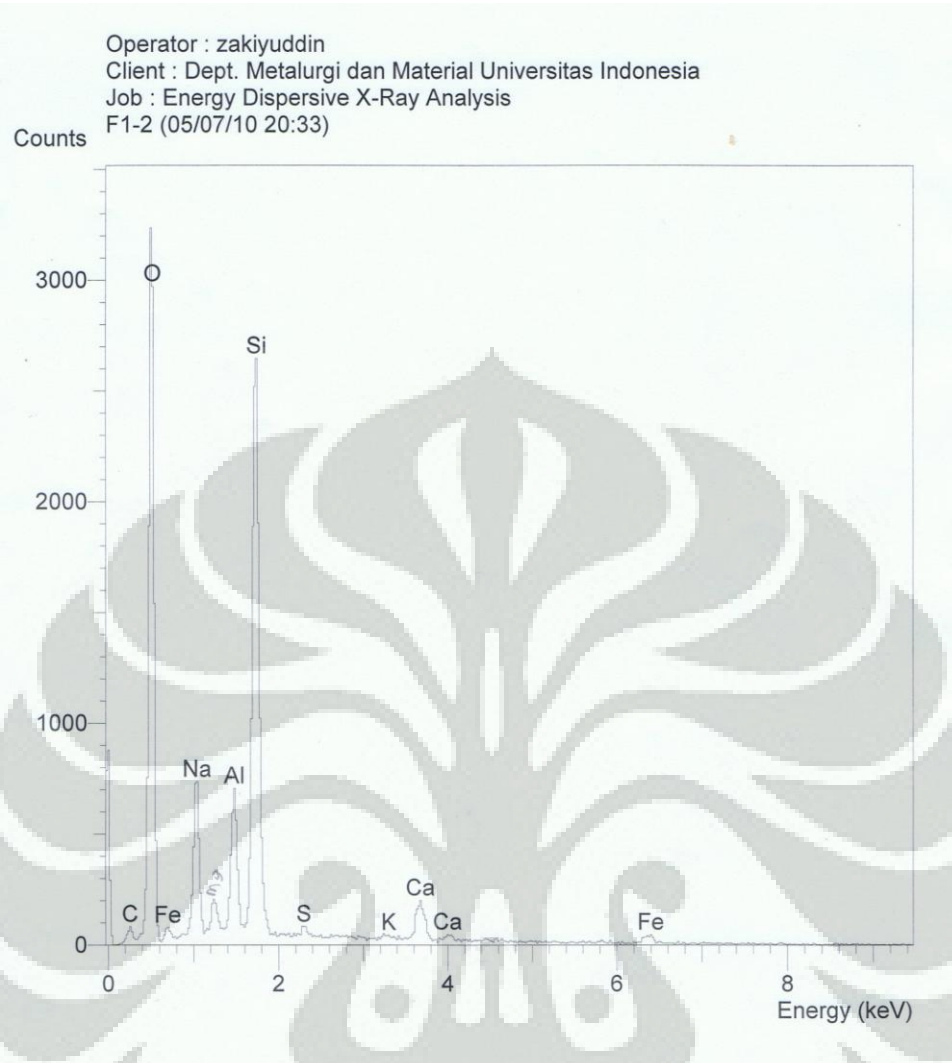






Lampiran A – 3 hasil EDX





SEMQuant results. Listed at 20:36:50 on 05/07/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: F1-2

System resolution = 61 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06
 O K AL2O3 17/11/09
 Na K Orthoclase 22/03/06
 Al K AL2O3 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 S K FeS2 22/03/06
 K K Orthoclase 22/03/06
 Ca K Orthoclase 22/03/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.47	0.80
O K	ED	49.02	63.25
Na K	ED	13.65	12.26
Al K	ED	6.20	4.74
Si K	ED	17.25	12.68
S K	ED	0.55	0.42
K K	ED	0.57	0.30
Ca K	ED	7.13	3.67
Fe K	ED	5.06	1.87
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 20:55:56 on 05/07/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: F1-2

System resolution = 61 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06
 O K AL2O3 17/11/09
 Na K Orthoclase 22/03/06
 Mg K MagOxide 22/03/06
 Al K AL2O3 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 S K FeS2 22/03/06
 K K Orthoclase 22/03/06
 Ca K Orthoclase 22/03/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.47	0.80
O K	ED	48.23	62.39
Na K	ED	13.53	12.18
Mg K	ED	1.42	1.21
Al K	ED	6.06	4.65
Si K	ED	17.08	12.59
S K	ED	0.64	0.41
K K	ED	0.57	0.30
Ca K	ED	7.02	3.62
Fe K	ED	4.98	1.85
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma



SEMQuant results. Listed at 20:51:17 on 05/07/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: F2-1

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF (4 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K Carbon Low 13/09/06
 O K AL2O3 17/11/09
 Na K Orthoclase 22/03/06
 Al K AL2O3 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 K K Orthoclase 22/03/06
 Ca K Orthoclase 22/03/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.51	0.86
O K	ED	55.07	69.98
Na K	ED	3.90	3.45
Al K	ED	12.04	9.07
Si K	ED	13.99	10.12
K K	ED	0.81	0.42
Ca K	ED	7.78	3.95
Fe K	ED	5.90	2.15
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 20:54:32 on 05/07/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: F2-1

System resolution = 60 eV

Quantitative method: ZAF (4 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

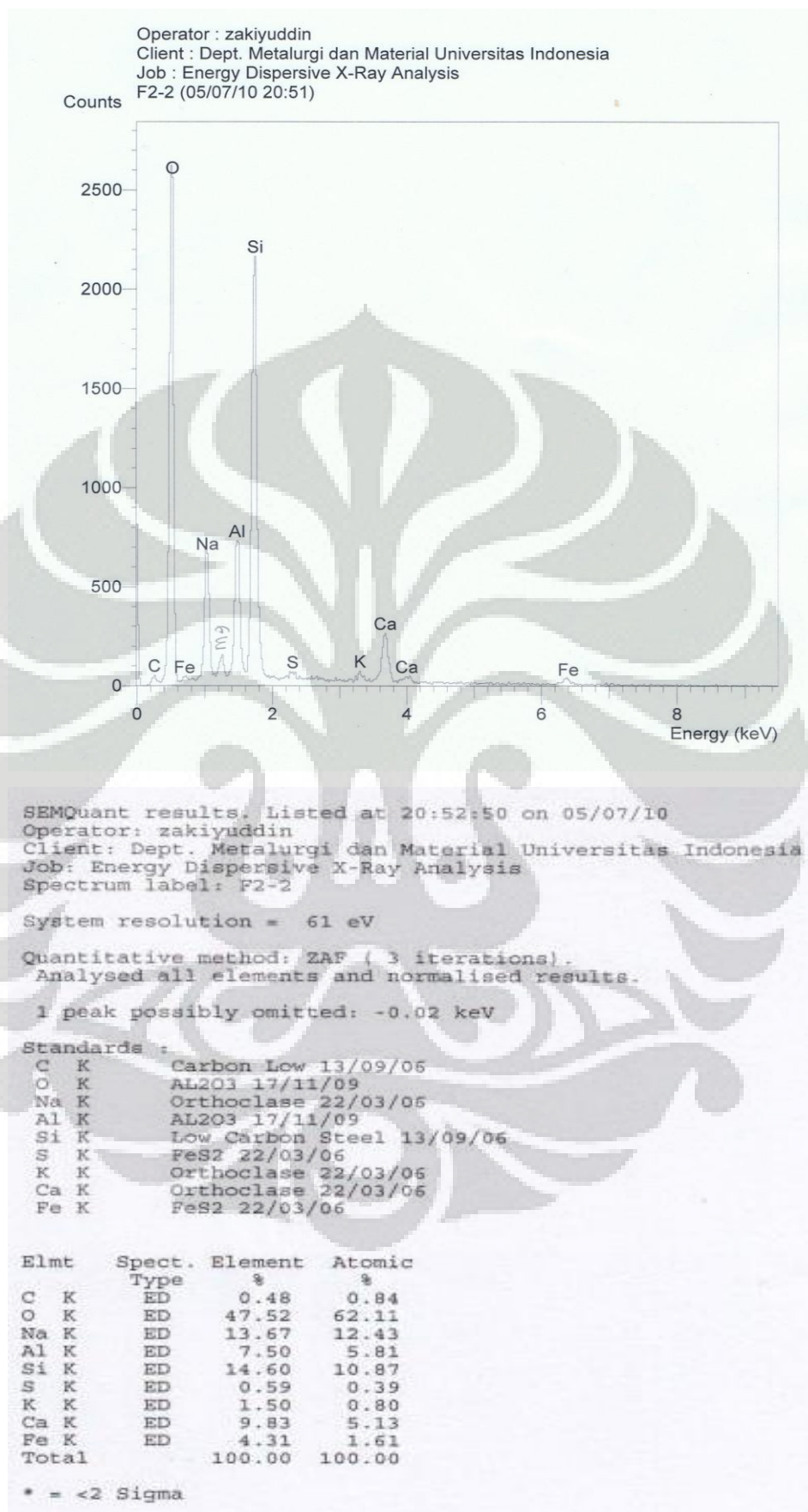
1 peak possibly omitted: -0.02 keV

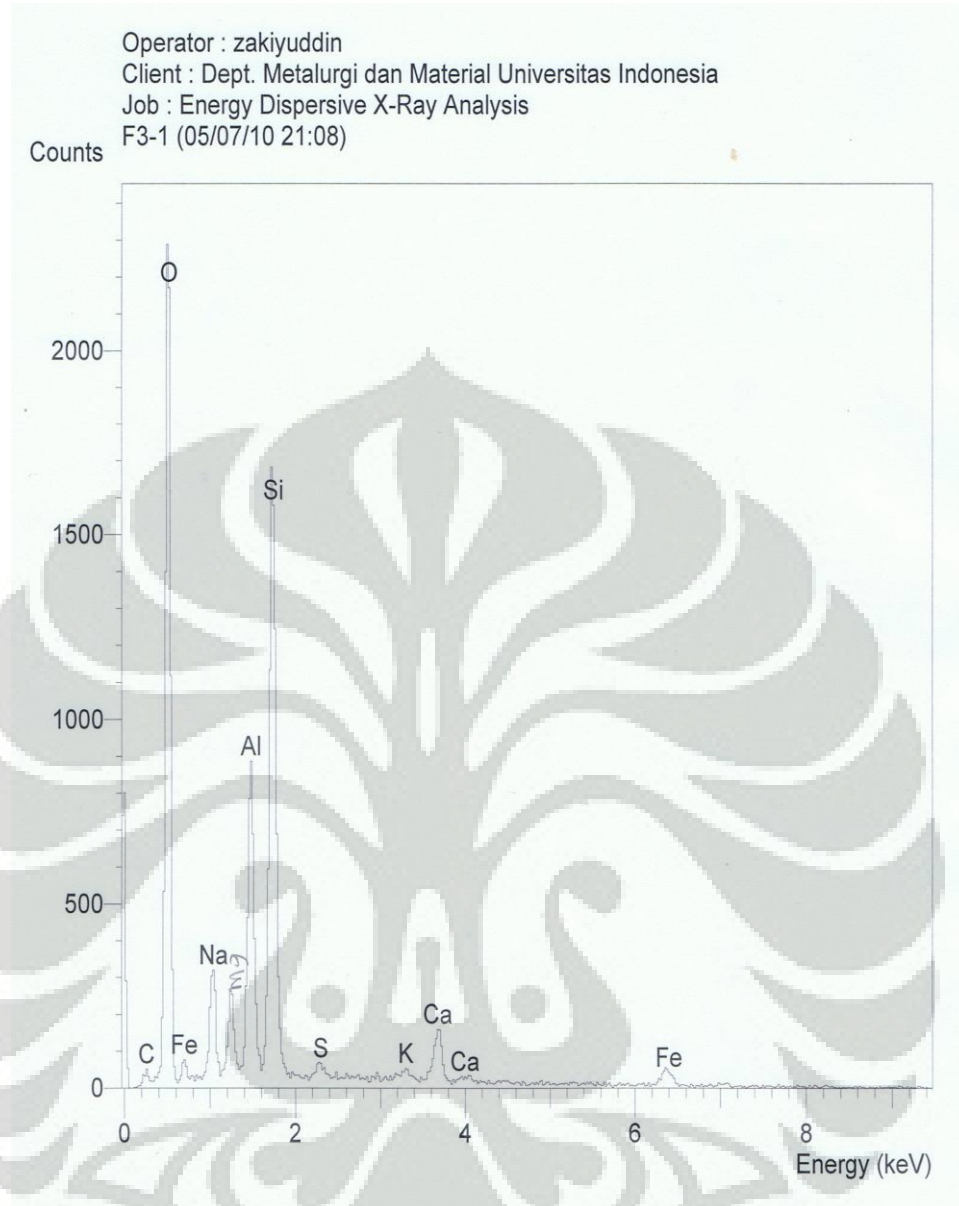
Standards :

C K Carbon Low 13/09/06
 O K AL2O3 17/11/09
 Na K Orthoclase 22/03/06
 Mg K MagOxide 22/03/06
 Al K AL2O3 17/11/09
 Si K Low Carbon Steel 13/09/06
 K K Orthoclase 22/03/06
 Ca K Orthoclase 22/03/06
 Fe K FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.51	0.86
O K	ED	53.06	67.83
Na K	ED	3.93	3.50
Mg K	ED	3.23	2.71
Al K	ED	11.62	8.81
Si K	ED	13.68	9.96
K K	ED	0.78	0.41
Ca K	ED	7.51	3.83
Fe K	ED	5.69	2.08
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma





SEMQuant results. Listed at 21:10:36 on 05/07/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: F3-1

System resolution = 61 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K	Carbon Low 13/09/06
O K	AL2O3 17/11/09
Na K	Orthoclase 22/03/06
Al K	AL2O3 17/11/09
Si K	Low Carbon Steel 13/09/06
S K	FeS2 22/03/06
K K	Orthoclase 22/03/06
Ca K	Orthoclase 22/03/06
Fe K	FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.63	1.11
O K	ED	47.85	63.52
Na K	ED	8.08	7.46
Al K	ED	10.70	8.42
Si K	ED	14.57	11.02
S K	ED	0.94	0.62
K K	ED	1.18	0.64
Ca K	ED	7.30	3.87
Fe K	ED	8.75	3.33
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 21:10:26 on 05/07/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: F3-1

System resolution = 61 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

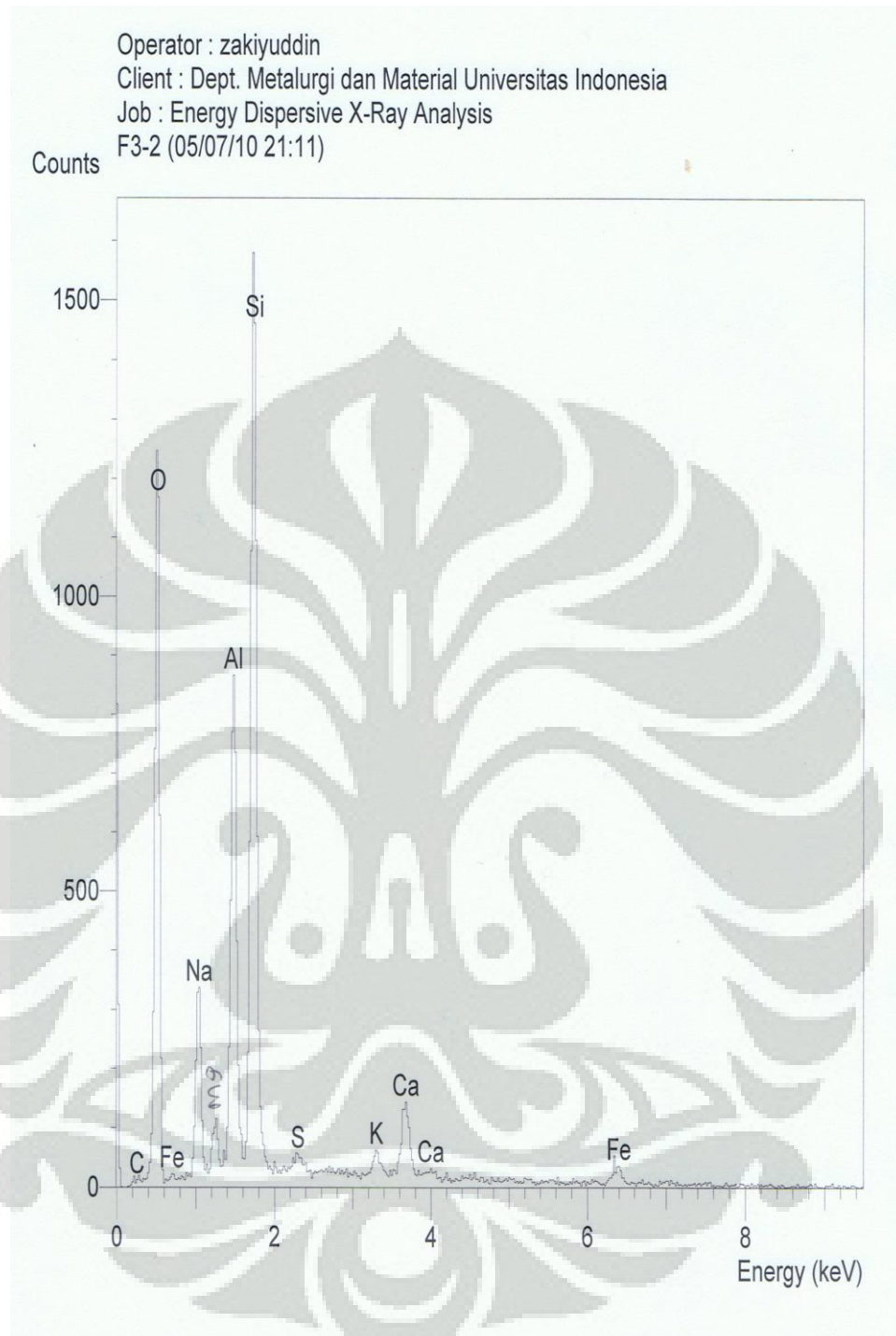
1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K	Carbon Low 13/09/06
O K	AL2O3 17/11/09
Na K	Orthoclase 22/03/06
Mg K	MgOxide 22/03/06
Al K	AL2O3 17/11/09
Si K	Low Carbon Steel 13/09/06
S K	FeS2 22/03/06
K K	Orthoclase 22/03/06
Ca K	Orthoclase 22/03/06
Fe K	FeS2 22/03/06

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.62	1.11
O K	ED	46.53	61.99
Na K	ED	7.95	7.37
Mg K	ED	2.48	2.17
Al K	ED	10.40	8.22
Si K	ED	14.33	10.88
S K	ED	0.92	0.61
K K	ED	1.15	0.62
Ca K	ED	7.12	3.78
Fe K	ED	8.51	3.25
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma



SEMQuant results. Listed at 21:12:29 on 05/07/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: F3-2

System resolution = 61 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K	Carbon Low 13/09/06
O K	AL2O3 17/11/09
Na K	Orthoclase 22/03/06
Mg K	MagOxide 22/03/06
Al K	AL2O3 17/11/09
Si K	Low Carbon Steel 13/09/06
S K	FeS2 22/03/06
K K	Orthoclase 22/03/06
Ca K	Orthoclase 22/03/06
Fe K	FeS2 22/03/06

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	0.80	1.49
O K	ED	36.71	51.80
Na K	ED	10.65	10.46
Mg K	ED	1.04	0.97
Al K	ED	13.49	11.29
Si K	ED	17.37	13.96
S K	ED	0.82	0.57
K K	ED	2.46	1.42
Ca K	ED	8.11	4.57
Fe K	ED	8.56	3.46
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

SEMQuant results. Listed at 21:12:36 on 05/07/10
 Operator: zakiyuddin
 Client: Dept. Metalurgi dan Material Universitas Indonesia
 Job: Energy Dispersive X-Ray Analysis
 Spectrum label: F3-2

System resolution = 61 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
 Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: -0.02 keV

Standards :

C K	Carbon Low 13/09/06
O K	AL2O3 17/11/09
Na K	Orthoclase 22/03/06
Al K	AL2O3 17/11/09
Si K	Low Carbon Steel 13/09/06
S K	FeS2 22/03/06
K K	Orthoclase 22/03/06
Ca K	Orthoclase 22/03/06
Fe K	FeS2 22/03/06

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
C K	ED	0.80	1.50
O K	ED	37.17	52.40
Na K	ED	10.75	10.55
Al K	ED	13.63	11.39
Si K	ED	17.49	14.05
S K	ED	0.82	0.58
K K	ED	2.48	1.43
Ca K	ED	8.19	4.61
Fe K	ED	8.66	3.50
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma