



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PERILAKU KUAT TEKAN SEMEN *RAPID-SETTING*
GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR *FLY ASH* DAN
METAKAOLIN**

SKRIPSI

KAMIL AFRIZAL

04 05 01 037 X

FAKULTAS TEKNIK

TEKNIK SIPIL

DEPOK

JANUARI 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PERILAKU KUAT TEKAN SEMEN *RAPID-SETTING*
GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR *FLY ASH* DAN
METAKAOLIN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

KAMIL AFRIZAL

04 05 01 037 X

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN STRUKTUR
DEPOK
JANUARI 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 : Kamil Afrizal

NPM : 04 05 01 037 X

Tanda Tangan : 

Tanggal : 4 Januari 2010

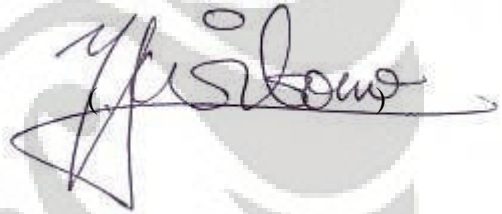
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Kamil Afrizal
NPM : 04 05 01 037 X
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Studi Perilaku Kuat Tekan Semen *Rapid-Setting*
Geopolimer Berbahan Dasar *Fly ash* dan
Metakaolin

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

DEWAN PENGUJI

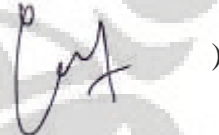
Pembimbing : Dr-Ing. Ir. Henki W Ashadi



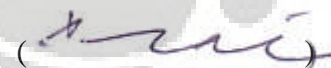
Pembimbing : Dr.Ir. Sotya Astutiningsih, M.Eng (



Penguji : Mulia Orientelize, ST, M. Eng (



Penguji : Ir. Sjahril A. Rahim, M.Eng (



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Januari 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena 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 Jurusan Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan kedua kakak saya yang telah memberikan bantuan dukungan dan doa yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Dr-Ing Henki W. Ashadi sebagai pembimbing pertama yang sangat memberikan semangat dan motivasi serta ilmu-ilmu yang membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini;
3. Dr Ir. Sotya Astutiningsih M.Eng selaku pembimbing kedua yang menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing saya mengerti tentang perilaku dan karakteristik geopolimer
4. Dr. Ir. Elly Tjahjono, DEA, selaku kepala laboratorium struktur dan material Departemen Sipil FTUI
5. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia lainnya yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya selama masa perkuliahan
6. Seluruh staf Departemen Teknik Sipil dan Laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
7. PT. Adhimix, yang telah memberikan material penelitian yaitu agregat kasar dan halus;
8. PT Indocement Tunggal Prakarsa Tbk atas ijin menggunakan lab dan perpustakaan dalam menguji thermal analysis;

9. M E Suryatriastuti (S'04), abdul hadi (S'02), yang memberikan inspirasi dalam mengerjakan skripsi bertemakan geopolimer ini;
10. Kekasih, atas rasa senang, sedih, kesal, bahagia, semangat, cinta dan sayangnya;
11. Sahabat senasib sepenanggungan, akmal, bagus, dan ihsan serta ilham. Semoga semangat selalu menyertai kalian semua. Terima kasih atas janji 4,5 tahun yang diikrarkan;
12. Teman-teman satu kosan yang selalu mengganggu dan menambah semangat, artur, yazid, fandi, curut, edu, yobi, yasti, dan dewi.
13. Teman-teman struktur 2005 yang sedang menyusun skripsi di semester ini atas dukungan dan canda tawanya;
14. Teman-teman sipil 2005 atas kerjasamanya selama masa perkuliahan, semoga tetap menjadi teman yang satu
15. Semua angkatan yang kenal saya, 2001- 2008. Terimakasih atas bimbingan dan interaksinya.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang teknik sipil dan material.

Depok, januari 2010

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Kamil Afrizal

NPM : 04 05 01 037 X

Program Studi : Teknik Sipil

Departemen : Teknik Sipil

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 :

STUDI PERILAKU KUAT TEKAN SEMEN RAPID-SETTING GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR FLY ASH DAN METAKAOLIN

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 memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 11 Januari 2010

Yang menyatakan



(Kamil Afrizal)

ABSTRAK

Nama : Kamil Afrizal
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Studi Perilaku Kuat Tekan Semen *Rapid-Setting* Geopolimer
Berbahan Dasar *Fly ash* dan Metakaolin

Pemanfaatan zat aditif sebagai akselerator sebagai campuran beton untuk perbaikan jalan beton merupakan salah satu alternatif yang sering diterapkan dan mudah diperoleh dipasaran. Namun, Akselerator mengandung ion-ion klorida dapat menyebabkan korosi pada baja beton bertulang. Selain itu, industri semen menghasilkan emisi karbon dioksida, komponen terbesar gas rumah kaca. Salah satu alternatif dalam masalah ini adalah pemanfaatan geopolimer sebagai semen instan. Bahan geopolimer digunakan berprekusor limbah batu bara dan bahan pembentuk porselen yang mudah didapatkan dan mengurangi dampak pencemaran lingkungan. Kedua bahan tersebut digunakan pada penelitian ini yaitu *fly ash* dan kaolonite. Kekuatan optimum geopolimer diperoleh dengan waktu yang lebih singkat bersamaan dengan proses pengerasan serta pengaruh suhu. Penelitian ini bertujuan Mengetahui proses sintesis dan teknologi dalam pembuatan semen instan geopolimer dan mengetahui nilai kuat tekan pasta dan beton geopolimer yang paling optimum dalam waktu tersingkat dengan dibandingkan dengan *curing* suhu ruang dan suhu 60° C. Kuat tekan awal pasta geopolimer dimana kuat tekan di uji pada waktu singkat yaitu 4 jam, 8 jam, dan 1 hari dengan waktu pengerasan yang dibandingkan antara suhu 60° Celcius dan suhu ruang. Dari penelitian ini didapat kesimpulan, untuk waktu *curing* yang sama, suhu lebih tinggi menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Pada suhu yang sama kuat tekan dari pasta geopolimer meningkat seiring dengan bertambahnya waktu *curing* khususnya untuk pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash*.

Kata Kunci : Semen geopolimer, kaolin, *fly ash*, pasta geopolimer, beton geopolimer, uji tekan.

ABSTRACT

Name : Kamil Afrizal
Study Program : Civil Engineering
Title : Behavior Study of Compressive Strength Rapid-setting Cement Geopolimer with Prekursor Fly ash and Metakaolin

Utilization of additives as an accelerator in concrete mix is often chosen to be an alternative for concrete road repair because it is easy to find. However, the additives contain chloride ions which can cause corrosion of steel reinforced concrete. In addition, the cement industry produces carbon dioxide emissions, the largest component of greenhouse gases. The other alternative is to use geopolymer as rapid-setting cement. At this study, fly ash and kaolinites are used as a precursor in the geopolymer, these materials are made from coal waste and porcelain-forming material which are easy to find and also able to reduce the effect of pollution. Geopolymer optimum strength obtained with a shorter time along with the hardening process and the influence of temperature. The aim of this study is to understand the synthetic process and technologies in manufacturing this rapid-setting cement. The other aim is to find the optimum value of compressive strength on geopolymer paste and geopolimer concrete in the short time (4, 8, and 24 hours of hardening) compared to the curing temperature of 60°C and room temperature. The conclusions of this study are higher temperature, at the same curing time, produce higher value of compressive strength. Longer curing time, at the same temperature, also produce higher value of compressive strength especially on fly ash.

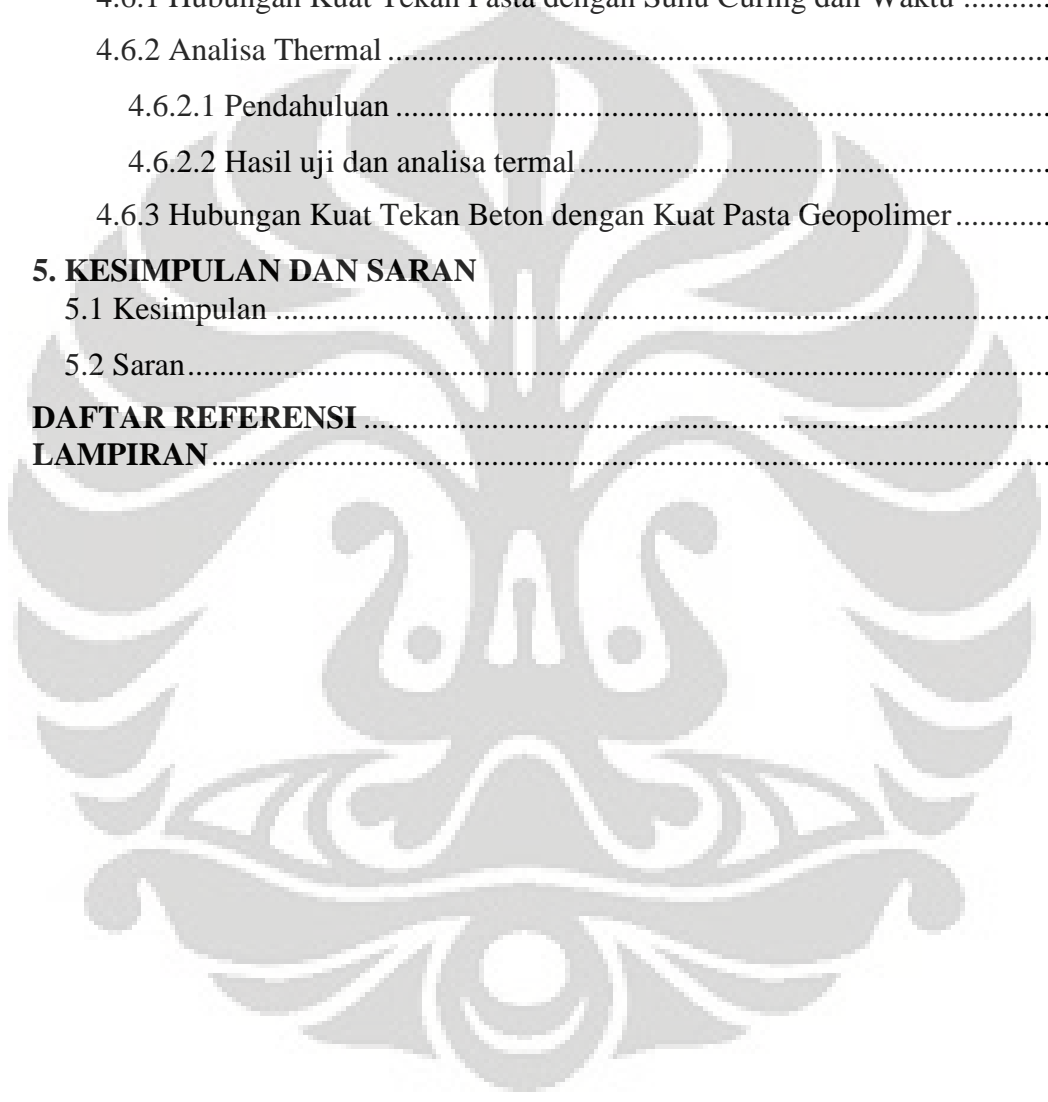
Keywords: Geopolymer cement, kaolin, fly ash, geopolymer paste, geopolimer concrete, compressive test.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.4 Batasan Penelitian	4
1.5 Hipotesa Awal	4
1.6 Metodologi Penelitian	5
1.7 Sistematika Penelitian	5
2. STUDI LITERATUR	7
2.1 Beton	7
2.1.1 Material Penyusun Beton	7
2.1.1.1 Agregat	7
2.1.1.2 Semen	10
2.1.1.3 Air	11
2.1.2 Karakteristik Beton	12
2.1.2.1 Kuat Tekan	12
2.1.2.2 Umur Beton	13
2.2 Beton Geopolimer	13
2.2.1 Material Penyusun.....	15
2.2.1.1 Prekusor	16
2.2.1.2 Aktivator	19
2.2.2 Polimerisasi	19
2.2.3 Karakteristik Beton Geopolimer	21
2.2.3.1 Ikatan Matriks – Inklusi	21
2.2.3.2 Kekuatan Mekanis	24
2.2.3.3 Ketahanan Kimia	25

3. METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Diagram Alir	27
3.2 Standar Pengujian.....	29
3.3 Persiapan Dan Pengujian Material	30
3.3.1 Agregat Halus.....	30
3.3.1.1 Analisa Specific Gravity dan Absorption.....	30
3.3.1.2 Pemeriksaan Berat Isi.....	32
3.3.1.3 Analisa Saringan Agregat Halus	33
3.3.1.4 Pemeriksaan Bahan Lewat Saringan No. 200	34
3.3.2 Agregat Kasar.....	36
3.3.2.1 Analisa Specific Gravity dan Absorption.....	36
3.3.2.2 Pemeriksaan Berat Isi.....	37
3.3.2.3 Analisa Saringan Agregat Kasar	38
3.3.3 Penyusun Pasta Geopolimer.....	39
3.4 Perhitungan Campuran Beton Geopolimer	40
3.4.1 Perhitungan Pasta Geopolimer	40
3.4.2 Mix Design Beton Geopolimer	41
3.5 Produksi Benda Uji	41
3.5.1 Persiapan	41
3.5.2 Pembuatan Pasta Geopolimer	42
3.5.3 Pembuatan Beton Geopolimer	42
3.6 Pengujian Sampel.....	43
3.6.1 Uji Kuat Tekan Pasta Geopolimer	43
3.6.2 Uji Kuat Tekan Beton Geopolimer	44
4. PEMBAHASAN DAN ANALISA	45
4.1 Pengujian Prekursor dan Aktivator	45
4.1.1 Pengujian Prekursor	45
4.1.3 Pengujian <i>Waterglass</i> (Na_2SiO_3).....	47
4.2 Pengujian Agregat Halus.....	47
4.2.1 Berat Jenis dan Penyerapan.....	47
4.2.2 Analisis Saringan dan <i>Fineness Modulus</i>	48
4.2.3 Kandungan Organik dan Kadar Lumpur.....	49
4.3 Pengujian Agregat Kasar.....	50

4.3.1 Berat Jenis dan Penyerapan.....	50
4.4 Perhitungan Campuran.....	50
4.5 Pengujian Geopolimer.....	52
4.5.1 Pasta Geopolimer	52
4.5.2 Beton Geopolimer	56
4.6 Analisa	58
4.6.1 Hubungan Kuat Tekan Pasta dengan Suhu Curing dan Waktu	58
4.6.2 Analisa Thermal	61
4.6.2.1 Pendahuluan	61
4.6.2.2 Hasil uji dan analisa termal.....	63
4.6.3 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Kuat Pasta Geopolimer.....	64
5. KESIMPULAN DAN SARAN	68
5.1 Kesimpulan	68
5.2 Saran.....	69
DAFTAR REFERENSI	70
LAMPIRAN	72



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Shape of coarse aggregate</i>	9
Gambar 2.2 Kadar air agregat	9
Gambar 2. 3 Ikatan alumina dan silika	18
Gambar 2. 4 Reaksi geopolimerisasi dari geopolimer	20
Gambar 2. 5 Reaksi polimerisasi	21
Gambar 2. 6 Pengaruh Suhu Ikat Terhadap Kuat Tekan	24
Gambar 2. 7 Pengaruh Kadar Air Terhadap Kuat Tekan	25
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian	27
Gambar 4. 1 Hasil XRD kaolin	46
Gambar 4. 2 Hasil XRD metakaolin	47
Gambar 4. 3 Gradasi pasir putih Bangka	49
Gambar 4. 4 Uji kadar organik pasir putih Bangka	50
Gambar 4. 5 Hasil uji kuat tekan pasta <i>fly ash</i>	53
Gambar 4. 6 Hasil uji kuat tekan pasta metakaolin	55
Gambar 4. 7 Hasil uji tekan beton geopolimer metakaolin	57
Gambar 4. 8 Pola retak beton geopolimer tipe B	57
Gambar 4. 9 Hasil uji kuat tekan beton geopolimer <i>fly ash</i>	58
Gambar 4. 10 Grafik perbandingan uji tekan pasta (<i>fly ash</i>)	59
Gambar 4. 11 Grafik perbandingan uji tekan pasta (metakaolin)	60
Gambar 4. 12 Grafik perbandingan uji tekan pasta	61
Gambar 4. 13 grafik analisa termal	62
Gambar 4. 14 Alat analisa termal DSC	62
Gambar 4. 15 <i>Heat flow</i> pasta geopolimer	63
Gambar 4. 16 <i>Heat flow</i> pasta geopolimer selama 24 jam	64
Gambar 4. 17 Perbandingan kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar <i>fly ash</i>	65
Gambar 4. 18 Perbandingan kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar metakaolin	66
Gambar 4. 19 Perbandingan kuat tekan beton geopolimer pada suhu 60° Celcius	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi bentuk agregat kasar	10
Tabel 2. 2 Jenis <i>fly ash</i>	17
Tabel 3. 1 Jumlah sampel uji	28
Tabel 3. 2 Ukuran Agregat Maksimum	35
Tabel 4. 1 Komposisi kimia <i>fly ash</i> hasil uji XRF	45
Tabel 4. 2 Komposisi kimia metakaolin hasil uji XRF	45
Tabel 4. 3 Komposisi kimia hasil uji XRF	47
Tabel 4. 4 Nilai <i>specific gravity</i> pasir putih Bangka	48
Tabel 4. 5 Analisa saringan pasir putih Bangka	48
Tabel 4. 6 Nilai <i>specific gravity</i> agregat kasar	50
Tabel 4. 7 komposisi campuran pasta metakaolin dan <i>fly ash</i>	51
Tabel 4. 8 Komposisi <i>fly ash</i> dan metakaolin	51
Tabel 4. 9 Komposisi campuran beton geopolimer untuk 3 buah sampel silinder	51
Tabel 4. 10 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer (<i>fly ash</i>) pada suhu ruang	53
Tabel 4. 11 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer (<i>fly ash</i>) pada suhu 60° C	54
Tabel 4. 12 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer (metakaolin) pada suhu ruang	55
Tabel 4. 13 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer (metakaolin) pada suhu 60° C	56
Tabel 4. 14 Hasil uji kuat tekan beton geopolimer metakaolin	57
Tabel 4. 15 Hasil uji kuat tekan beton geopolimer <i>fly ash</i>	58

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Jalan raya dapat meningkatkan kegiatan ekonomi di suatu tempat karena menolong orang untuk pergi atau mengirim barang lebih cepat ke suatu tujuan. Dengan adanya jalan raya, komoditi dapat mengalir ke pasar setempat dan hasil ekonomi dari suatu tempat dapat dijual kepada pasaran di luar wilayah itu. Selain itu, jalan raya juga mengembangkan ekonomi lalu lintas di sepanjang lintasannya.

Secara umum konstruksi perkerasan jalan raya terdiri atas dua jenis, yaitu perkerasan lentur yang bahan pengikatnya adalah aspal dan perkerasan kaku dengan semen sebagai bahan pengikatnya, atau yang biasa disebut sebagai jalan beton. Jalan beton biasanya digunakan untuk ruas jalan dengan hirarki fungsional arteri yang berada di kawasan dalam ataupun luar kota untuk melayani beban lalu-lintas yang berat dan padat, contohnya pada busway yang beroperasi di Jakarta. Selain itu karena biaya pemeliharaan jalan beton dapat dikatakan nihil walaupun biaya awalnya lebih tinggi dibandingkan dengan jalan aspal, maka sangatlah tepat jika jalan beton digunakan pada ruas-ruas jalan yang sangat sibuk.

Kerusakan pada jalan beton dapat mengakibatkan terganggunya aktivitas perekonomian. Perbaikan jalan yang dilakukan akan mengundang kemacetan (kasus bottle neck) yang tentunya akan berdampak sangat luas. Semen konvensional portland memiliki kelemahan terlalu lama proses mengerasnya. Ini akan mengganggu 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. Dampaknya adalah kemacetan lalu lintas tidak dapat dielakkan lagi.

Selain itu, industri semen menghasilkan emisi karbon dioksida, komponen terbesar gas rumah kaca, yang dihasilkan dari proses kalsinasi kapur dan pembakaran batu bara. Isu lingkungan ini tampaknya akan memainkan peran penting dalam kaitan dengan isu pembangunan berkelanjutan di masa mendatang. Dalam produksi satu ton semen Portland, akan dihasilkan sekitar satu ton gas

karbon dioksida yang dilepaskan ke atmosfer. Dari data tahun 1995, jumlah produksi semen di dunia tercatat 1,5 miliar ton. Hal ini berarti industri semen melepaskan karbon dioksida sejumlah 1,5 miliar ton ke alam bebas. (Rosdianti, 2009)

Menurut International Energy Authority: World Energy Outlook, jumlah karbon dioksida yang dihasilkan tahun 1995 adalah 23,8 miliar ton. Angka itu menunjukkan produksi semen portland menyumbang tujuh persen dari keseluruhan karbon dioksida yang dihasilkan berbagai sumber. Tampaknya proporsi ini akan terus bertahan atau bahkan meningkat sesuai dengan peningkatan produksi semen kalau tidak ada perubahan berarti dalam teknologi produksi semen atau didapatkan bahan pengganti semen. Pada tahun 2010, diperkirakan total produksi semen di dunia mencapai angka 2,2 miliar ton. (Rosdianti, 2009)

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 sering diterapkan dan dapat diperoleh dipasaran dengan mudah. Untuk mempersingkat proses pengerasan semen konvensional dapat menggunakan zat aditif sebagai akselerator. Ada dua jenis senyawa yang umum dipakai sebagai akselerator, yaitu kalsium klorida dan natrium klorida. Penambahan kalsium dan natrium klorida tidak dianjurkan oleh *American Concrete Institute* (ACI) untuk beton prategang dan beton bertulang. Sebab, ion-ion klorida dapat menyebabkan korosi pada baja yang dipakai untuk beton prategang dan beton bertulang. Selain itu, penambahan kalsium klorida pada beton dapat menurunkan ketahanannya terhadap sulfat. Sebenarnya akselerator yang tidak korosif dapat diperoleh di pasaran, misalnya senyawa – senyawa tertentu dari nitrat, format dan nitrit, hanya saja harganya lebih mahal dan kemampuan akseleratornya kurang efektif.

Semen geopolimer memiliki potensi sebagai semen instan. Berbeda dengan semen Portland type 1, kekuatan optimum geopolimer diperoleh dengan waktu yang lebih singkat bersamaan dengan proses pengerasan serta pengaruh suhu. Geopolimer merupakan material polimer anorganik yang tersusun atas atom Si dan Al yang tersusun dalam jaringan 3 dimensi. Geopolimer disintesa dari bahan

baku (prekursor) yang berupa senyawa alumina – silika dengan aktivator yang berupa larutan alkali silikat.

Fly ash dan metakaolin merupakan prekursor yang dapat membentuk semen geopolimer. *Fly ash* merupakan salah satu limbah yang dihasilkan oleh proses pembakaran batu bara pada PLTU. Proses pembakaran ini menghasilkan residu yang unsur utamanya berupa oksida alumina dan silika. *Fly ash* sendiri tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen, tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silika yang dikandung oleh abu terbang ini akan bereaksi secara kimia dengan aktivator yang berupa larutan alkali silikat dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat. Metakaolin merupakan hasil dari dehidroksilasi dari kaolin. Kaolin merupakan mineral utama dari pembuatan porselen. Selain lebih ramah lingkungan, mengurangi jumlah energi yang diperlukan karena berkurangnya pemakaian semen, lebih awet dan lebih murah, bahan ini juga tetap menunjukkan perilaku mekanik memuaskan. Dari campuran antara prekursor dan aktivator ini nantinya akan diterapkan sebagai semen instan yang dapat berfungsi sebagai semen instan untuk perbaikan jalan beton.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian dengan judul “Studi Perilaku Kuat Tekan Semen *Rapid-Setting* Geopolimer Berbahan Dasar *Fly ash* dan Metakaolin” ini merupakan salah satu prasyarat kelulusan mahasiswa sebagai sarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Selain tujuan diatas, ada juga tujuan lain seperti :

- Mengetahui proses sintesis dan teknologi dalam pembuatan semen instan geopolimer
- Mengetahui nilai kuat tekan pasta dan beton geopolimer yang paling optimum dalam waktu tersingkat
- Menemukan alternatif solusi untuk perbaikan jalan beton dengan semen instan geopolimer
- Agar mahasiswa dapat melihat aplikasi dari teori yang telah diperoleh selama menjalani perkuliahan dengan praktek di lapangan.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini akan meninjau perilaku dari semen instan geopolimer. Semen instan geopolimer tersusun atas prekursor yang merupakan bahan dasar dari pembuatan semen geopolimer dan larutan aktivator. Prekursor yang digunakan adalah abu terbang (*fly ash*) dan metakaolin. Aktivator yang digunakan adalah larutan natrium silikat atau dikenal dengan sebutan *waterglass*.

Perilaku yang ditinjau adalah kemampuan semen instan geopolimer yang memiliki kekuatan awal tinggi (*high early strength*) dan pengerasan tercepat (*rapid setting*).

1.4 Batasan Penelitian

Pedoman, teori, peralatan dan prosedur percobaan yang dipakai dalam penulisan skripsi ini mengacu kepada standar dari *American Society for Testing and Material* dengan memperhatikan Standar Nasional Indonesia terbitan PusLitbang Departmen Pekerjaan Umum.

Kuat tekan awal pasta geopolimer dimana kuat tekan di uji pada waktu singkat yaitu 4 jam, 8 jam, dan 1 hari dengan suhu pengerasan yang dibandingkan antara suhu 60⁰ Celcius dan suhu ruang. Setelah mendapatkan kuat pasta tersebut, akan dilanjutkan untuk diuji pada sampel silinder untuk beton geopolimer untuk aplikasi terhadap beton.

1.5 Hipotesa Awal

Pada penelitian ini akan ditinjau pengaruh dari suhu *curing* dan waktu *curing*. Suhu curing semakin tinggi maka waktu curing untuk beton geopolimer akan semakin singkat. Namun, suhu terlampau tinggi diatas seratus derajat, curing tidak akan terjadi dikarenakan air menguap pada suhu 100⁰ C keatas.

Dari penelitian uji coba sebelumnya diketahui bahwa waktu pengerasan bervariasi dengan mengatur kadar zat tertentu dari bahan baku serta suhu pengerasan, sedangkan kekuatan mekanis geopolimer lebih ditentukan oleh bentuk dan ukuran partikel serta kemampu-larutan (reaktivitas) dari bahan baku [Astutiningsih, 2003, 2005a, 2005b; Astutiningsih dan liu, 2005, 2006].

Menurut Swanepoel dan Strydom (2002) melakukan suatu penelitian tentang geopolimer yang diproduksi dengan pencampuran *fly ash*, kaolin, larutan natrium

silikat, NaOH dan air. Kedua faktor waktu dan temperatur masa curing mempengaruhi kuat tekan tersebut, dan kekuatan optimum terjadi ketika material di-curing pada suhu 60° C.

1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan studi literatur, membuat hipotesa, membuat metode percobaan, melakukan percobaan, membuat pengolahan data percobaan, menganalisa hasil percobaan, dan membuat kesimpulan.

Urutan kegiatannya adalah :

1. Studi literatur.
2. Pemahaman karakteristik semen instan geopolimer
3. Pembuatan hipotesa.
4. Penentuan komposisi benda uji.
5. Pembuatan benda uji di laboratorium.
6. Pengujian benda uji di laboratorium.
7. Pengumpulan data percobaan di laboratorium.
8. Pengolahan data percobaan.
9. Pembuatan analisa hasil dan kesimpulan.

1.7 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan didasarkan pada fakta lapangan hasil penelitian yang dilakukan dengan perbandingan dengan sumber – sumber yang bersifat teoritis. Sistematikanya adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, batasan penelitian, hipotesa awal, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II STUDI LITERATUR

Berisi tentang dasar teori tentang beton konvensional, beton geopolimer, serta dasar pengolahan hasil data.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

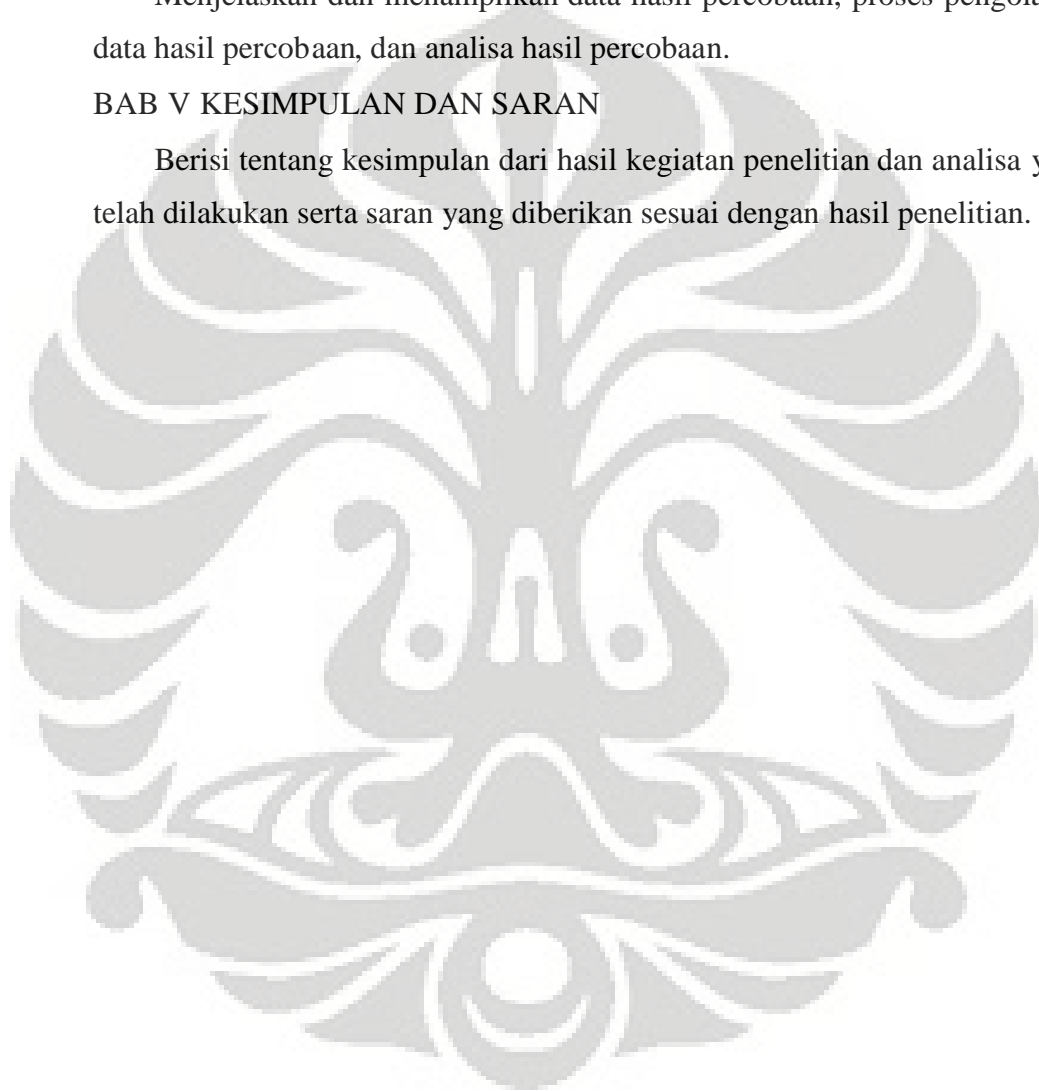
Memberikan penjelasan tentang tahapan – tahapan yang dilakukan dalam penelitian. Berisi tentang pengujian material penyusun beton, pembuatan sampel pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan metakaolin, dan sampel beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan metakaolin.

BAB IV HASIL DAN PERCOBAAN

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

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

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



BAB 2

STUDI LITERATUR

2.1 Beton

Beton adalah material yang telah banyak digunakan sebagai bahan konstruksi. Secara umum beton terdiri dari dua bagian utama. Bagian pertama adalah bahan matriks yang berfungsi sebagai pengikat antar material (*adhesive*), selain sebagai pengikat bahan matriks juga memberikan sumbangan kekuatan, apabila bahan ini tidak hadir pada beton maka beton tersebut tidak akan memiliki kekuatan sama sekali. Bagian yang kedua adalah bahan inklusi yang menyumbangkan sebagian besar kekuatan dari beton itu sendiri. Inklusi merupakan agregat yang terdiri dari material anorganik yang biasanya berupa mineral alami seperti batu/kerikil dan pasir.

Ada banyak tipe beton yang telah dikenal, beton semen adalah beton yang terdiri dari pasta semen sebagai matriks dan agregat sebagai inklusi. Beton semen sangat kuat menahan gaya tekan namun lemah apabila diberikan gaya tarik. Terdapat juga beton aspal yang terdiri dari aspal sebagai matriks dan agregat sebagai inklusi. Perbedaan dari kedua tipe beton tadi terdapat pada peruntukannya, beton semen biasa digunakan dalam konstruksi bangunan dan jalan, sedangkan beton aspal secara umum hanya digunakan sebagai bahan perkerasan jalan. Perbedaan penggunaan bahan matriks akan memberikan karakteristik yang berbeda untuk tiap beton. Hal ini akan berpengaruh pada sifat-sifatnya, seperti kuat tekan, kuat tarik, waktu ikat, suhu ikat, workabilitas, modulus elastisitas dan lainnya.

2.1.1 Material Penyusun Beton

Beton yang sering digunakan pada proyek-proyek konstruksi pada umumnya terdiri dari pasta semen dengan campuran sebagai pengikat serta agregat sebagai inklusi.

2.1.1.1 Agregat

Dalam SNI T-15-1991-03, agregat didefinisikan sebagai material granular, misalnya pasir, kerikil, batu pecah, dan kerak tungku besi yang dipakai bersama-sama dengan suatu media pengikat untuk membentuk beton semen hidrolis atau

adukan. Pada beton semen biasanya volume agregat yang digunakan adalah 50-80% dari volume total beton, sehingga kondisi agregat yang digunakan sangat berpengaruh pada karakteristik beton.

Kualitas agregat adalah hal yang perlu diperhatikan, mengingat agregat secara umum menempati 70%-75% dari total volume beton (P. Nugraha, 1989). Agregat tidak saja berpengaruh pada kekuatan beton, tetapi sifat-sifat agregat juga berpengaruh pada daya tahan dan kekompakan strukturnya. Sifat-sifat agregat yang penting dalam pembuatan beton pada umumnya adalah bentuk, gradasi, kekuatan, modulus elastisitas serta interaksi kimia dan fisiknya dengan semen yang mempengaruhi retakan antara agregat dan mortar. Selain itu, kekuatan beton dipengaruhi oleh proporsi campuran, kebersihan air dan agregatnya. Oleh karena itu, selain harus memiliki kekuatan dan daya tahan baik, butir agregat disyaratkan harus bersih dari lumpur atau material organik lainnya yang dapat mengurangi kekuatan beton. Diameter lumpur atau material organik ini adalah kurang dari 0.063 mm. bila banyaknya lumpur atau material organik yang dikandung dalam agregat lebih dari 1% berat kering, agregat tersebut harus dicuci.

Agregat pada beton mempunyai tiga fungsi utama yaitu :

1. Sebagai material pengisi yang relatif lebih murah dari semen.
2. Sebagai material padat yang tahan terhadap beban yang bekerja, abrasi, perkolasi air dan pengaruh cuaca.
3. Mengurangi kembang-susut dari pasta semen (Troxell, 1956)

Kriteria agregat bergantung pada karakteristik – karakteristik di bawah ini :

1) Ukuran Agregat

Berdasarkan ukurannya, agregat dibedakan menjadi:

- a] Agregat halus (*fine aggregate*) diameter 0–5 mm disebut pasir, yang dapat dibedakan lagi menjadi :
 - Pasir halus: \varnothing 0 – 1 mm
 - Pasir kasar: \varnothing 1 – 5 mm
- b] Agregat kasar (*coarse aggregate*) diameter > 5 mm, biasanya berukuran antara 5 hingga 40 mm, disebut kerikil.

Ukuran agregat dapat dilihat panjang dan lebar nya sesuai pada gambar 2.1.

2) Visual Bentuk

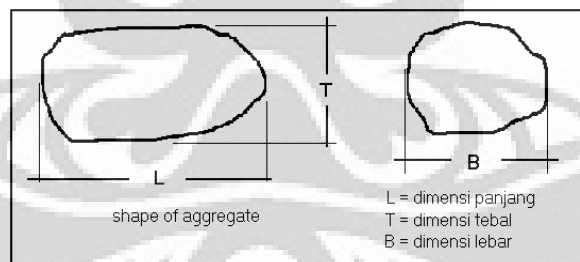
Oleh karena bentuknya yang bervariasi, agregat diklasifikasikan bentuk menjadi bulat, lonjong, pipih atau kubikal seperti dapat terlihat pada tabel 2.1. Bentuk yang paling baik dalam pembuatan beton adalah kubikal, karena bentuk ini memiliki kekuatan yang lebih besar dari bentuk yang pipih dan akan saling mengunci antar agregat (*interlocking*). Namun bentuk kubikal akan mempersulit pekerjaan, karena kemampuan mengalir (*flowability*) yang rendah.

3) Visual Tekstur Permukaan

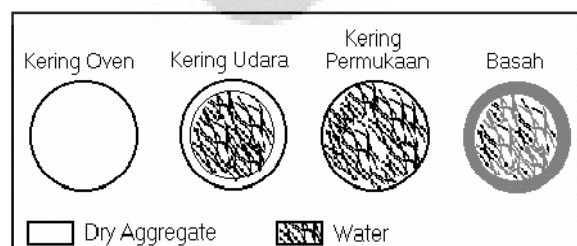
Secara visual dapat dibedakan menjadi kasar, halus, rata atau bergelombang. Tekstur yang kasar akan memberikan pengikatan yang lebih baik oleh semen, hal ini disebabkan karena luas permukaan yang lebih besar pada agregat bertekstur kasar

4) Berat Jenis dan Absorpsi

Berat jenis dibedakan menjadi beberapa tipe berdasarkan kondisinya yang dapat dilihat pada gambar 2.2. Kondisi tersebut adalah kering oven (*oven dry*), kering permukaan (*saturated surface dry*), kering udara dan kondisi basah. Biasanya pada pekerjaan beton digunakan kondisi kering permukaan karena pada saat pencampuran pasta semen akan diserap masuk oleh permukaan agregat, namun karena bagian dalam agregat terisi air maka penyerapan air tidak berlebihan. Hal ini akan memperkuat ikatan antar agregat.



Gambar 2.1 *Shape of coarse aggregate*
(M. E. Suryatriyastuti, 2008)



Gambar 2.2 Kadar air agregat
(M. E. Suryatriyastuti, 2008)

Tabel 2.1 Klasifikasi bentuk agregat kasar

Klasifikasi	Deskripsi	Contoh
<i>Bulat</i>	Aus akibat air atau terbentuk akibat keseluruhannya	Kerikil sungai
<i>Tidak beraturan</i>	Tak beraturan alami, atau sebagian terkikis dan memiliki bentuk bulat	Kerikil lain; batu tanah atau galian
<i>Flaky</i>	Material yang tipis pada salah satu sisinya	Batu yang terlindung salah satu sisinya
<i>Angular</i>	Memiliki bentuk sisi yang baik pada potongan sisi planar yang kasar	Batuan tebing yang dipecah, batuan kerak
<i>Elongated</i>	Material yang bersudut salah satunya lebih panjang dari yang lain	
<i>Flaky dan Elongated</i>	Material yang memiliki panjang yang lebih besar dari lebarnya dan lebar ini lebih besar dari tebalnya	

(Adam Neville, properties of concrete, 3rd edition, 1988)

2.1.1.2 Semen

Material pengikat yang sering digunakan pada beton konstruksi secara umum adalah semen. Namun tidak menuntut kemungkinan adanya penggunaan material pengikat lain selain semen.

Semen merupakan istilah yang umum digunakan untuk menggambarkan campuran bahan organik dan anorganik yang menyusunnya. Secara umum semen adalah material yang mempunyai sifat adhesif dan kohesif yang dapat mengikat butiran-butiran mineral menjadi satu kesatuan yang kompak. Dalam pengertian sehari-hari semen yang dikenal merupakan *Hydraulic Cement* atau Semen Hidrolis karena kemampuannya bereaksi dengan air dan mengeras dalam kondisi tanpa udara. Kemampuan mengeras dalam kondisi tanpa udara membedakannya dengan semen lainnya yang dapat bereaksi dengan air akan tetapi proses reaksinya masih tergantung kepada karbondioksida untuk mendapatkan peningkatan tegangan dalam proses pengerasannya.

Semen hidrolis terbagi atas 3 (tiga) yaitu:

1. Semen Portland
2. Semen Alumina
3. Semen Alamiah

Berdasarkan Standar Industri Indonesia (SII) 0031-1981, semen Portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidraulis, bersama bahan tambahan yang biasanya digunakan adalah *gypsum*.

Bahan pembentuk semen Portland adalah:

- Kapur (CaO), dari batu kapur
- Silika (SiO₂), dari lempung
- Aluminium (Al₂O₃), dari lempung.

Sedangkan bahan utama campuran semen Portland adalah:

- Trikalsium Silikat (3CaO.SiO₂) atau C₃S
- Dikalsium Silikat (2CaO.SiO₂) atau C₂S
- Trikalsium Aluminat (3CaO.Al₂O₃) atau C₃A
- Tetrakalsium Alumino Ferrid (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) atau C₄AF
- Gypsum (CaSO₄.2H₂O)

Senyawa C₃S dan C₂S berpengaruh besar terhadap kekakuan semen, di mana C₃S berpengaruh pada kekuatan awal, sedangkan C₂S berpengaruh terhadap kekuatan semen pada tahap selanjutnya. Waktu yang diperlukan oleh semen dari keadaan cair menjadi mengeras disebut waktu pengikatan (*setting time*).

2.1.1.3 Air

Air diperlukan dalam pembentukan beton untuk hidrasi semen, membasahi agregat dan memudahkan proses pencampuran untuk kemudahan pekerjaan. Agar beton mudah dikerjakan harus ditentukan perbandingan antara jumlah air dan semen yang digunakan. Kualitas air perlu diperhatikan karena kandungan kotoran yang ada di dalamnya akan mempengaruhi mutu beton. Salah satunya dapat mengurangi kekuatan beton. Selain dilakukan pemeriksaan visual dalam kejernihannya, perlu pula dilakukan pemeriksaan mengenai kandungan bahan-bahan perusak. Contoh asam, alkali, bahan-bahan organik dan lain-lain. Penelitian semacam ini harus dilakukan di laboratorium kimia. Selain itu air dibutuhkan untuk reaksi pengikatan pada beton, dapat pula digunakan untuk masa perawatan beton setelah pengecoran.

Proporsi air yang sedikit pada beton akan memberikan kekuatan yang tinggi pada beton, sebaliknya kadar air yang berlebihan akan mengurangi kekuatan

beton. Namun faktor kadar air akan sangat berpengaruh dalam kemudahan pekerjaan beton. Semakin encer beton akan semakin mudah dikerjakan, dan sebaliknya semakin sedikit kadar air maka beton akan semakin sukar dikerjakan. Sifat ini digambarkan oleh workabilitas. Proporsi air dinyatakan dalam *rasio air-semen (water-cement ratio)*, yaitu angka yang menyatakan perbandingan antara berat air (kg) dibagi berat semen (kg) dalam campuran beton.

Kualitas air yang digunakan juga harus baik, yaitu terlepas dari kadar garam yang tinggi, dan material organik yang dapat merusak beton seperti alkali. Dalam beton air berfungsi sebagai campuran untuk membuat bahan pengikat, yaitu melalui bereaksi dengan semen.

2.1.2 Karakteristik Beton

Untuk mempermudah penggunaan dan pengerjaan beton, banyak pihak telah melakukan penelitian terhadap karakteristik beton serta faktor-faktor yang mempengaruhinya. karakteristik tersebut, yang akan dijabarkan di bawah ini

2.1.2.1 Kuat Tekan

Kuat tekan dari beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

- 1) *Jenis semen dan kualitasnya.* Mempengaruhi kekuatan rata-rata dan kuat batas beton.
- 2) *Jenis dan lekak-lekuk bidang permukaan agregat.* Penggunaan agregat akan menghasilkan beton dengan kuat desak maupun tarik lebih besar daripada penggunaan kerikil halus dari sungai.
- 3) *Kualitas dari perawatan (curing).* Kehilangan sampai 40 % dapat terjadi bila pengeringan dilakukan sebelum waktunya.
- 4) *Suhu ikat.* Pada umumnya kecepatan pengerasan beton bertambah dengan bertambahnya suhu. Pada titik beku (0° C) kuat tekan akan tetap rendah pada waktu yang lama.
- 5) *Umur.* Pada keadaan normal, kekuatan beton akan bertambah seiring dengan bertambahnya umur. Kecepatan pertambahan kekuatan tergantung pada jenis semen. Misalnya semen dengan kadar alumina tinggi menghasilkan beton dengan kuat tekan pada 24 jam setara dengan kuat tekan semen portland pada 28 hari.

2.1.2.2 Umur Beton

Kekuatan beton akan bertambah dengan bertambahnya umur beton. Kekuatan beton akan bertambah secara cepat sampai pada umur 28 hari, dan setelah itu pertambahan kekuatan beton akan menjadi kecil. Kekuatan beton pada kasus tertentu akan terus bertambah sampai beberapa tahun. Kekuatan tekan rencana beton umumnya dihitung pada umur 28 hari. Rasio pertambahan kuat tekan beton setelah umur 28 hari terhadap kuat

2.2 Beton Geopolimer

Dilihat dari material penyusun beton, maka sangatlah mungkin untuk mencari variasi bahan matriks yang dapat menggantikan penggunaan semen sebagai bahan matriks beton konvensional. Hal ini bertujuan untuk memenuhi isu lingkungan yaitu mengurangi produksi CO₂ sebagai hasil samping produksi semen portland. Selain itu, diharapkan akan dapat ditemukan beton baru yang memiliki karakteristik lebih baik dari beton yang telah ada.

Bahan matriks yang akan dibuat pada penelitian ini adalah geopolimer, yang selama 30 tahun terakhir telah banyak dilakukan penelitian. Bahan geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Davidovits. Karakteristik dari beton geopolimer bermacam-macam tergantung dari bahan pembentuk geopolimernya, diantaranya : *fly ash*, *blast furnace slag*, *pozzolan* dan lainnya.

Dari beberapa penelitian terakhir, beton geopolimer memberikan performa luar biasa pada waktu ikat, susut, rangkai dan ketahanan bahan korosif. Beton geopolimer tertentu dapat mencapai kekuatan hingga 100 MPa, dan dalam 4 jam dapat mencapai kekuatan 20 MPa. (Davidovits dan Sawyer, 1985)

Davidovits (1988) memperkenalkan istilah '*geopolymer*' pada tahun 1978 sebagai gambaran bahwa mineral polymer tersebut adalah hasil ilmu geokimia. Geopolimer, suatu polimer alumina-silika anorganik, dibentuk dari sebagian besar unsur silikon (Si) dan aluminium (Al). Komposisi kimia dari material geopolymer adalah serupa dengan zeolit, tetapi geopolimer memiliki *amorphous microstructure* (Davidovits, 1999). Sepanjang proses sintesis, silika dan aluminium digabung untuk membentuk blok bangunan, yang secara kimiawi dan struktural dapat dibandingkan dengan ikatan batu alam.

Banyak literatur tersedia tentang material ini sehubungan dengan pasta geopolimer. Davidovits dan Sawyer (1985) menggunakan *ground blast furnace slag* untuk menghasilkan produk geopolimer. Mereka mematenkan produk mereka dengan didokumentasikan ke dalam jurnal ilmiah di AS dengan judul “*Early High-Strength Mineral Polymer Was Used As A Supplementary Cementing Material In The Production Of Precast Concrete Products*”. Sebagai tambahan suatu mortar semen siap pakai, dimana hanya perlu tambahan campuran air untuk menghasilkan material yang tahan lama dan cepat mengeras, telah diproduksi dan dimanfaatkan pada renovasi airport baik untuk landasan pacu, landasan hubung, dan apron, pada pembangunan jalan raya dan geladak jembatan, dan untuk beberapa konstruksi ketika kekuatan awal beton yang besar sangat diperlukan. (Davidovits dan Sawyer, 1985)

Van Jaarsveld, van Deventer, dan Schartzman (1999) melakukan eksperimen tentang geopolimers menggunakan dua jenis *fly ash*. Mereka menemukan bahwa kuat tekan geopolimer setelah 14 hari adalah sekitar 5 - 51 MPa. Faktor yang mempengaruhi kuat tekan itu adalah saat proses pencampuran bahan dan komposisi kimia dari *fly ash*. Senyawa CaO yang lebih tinggi akan mengurangi porositas dari mikro-struktur, dan meningkatkan kuat tekan. Di samping itu, rasio perbandingan air dengan *fly ash* juga mempengaruhi kekuatan material. Jika rasio perbandingan air dengan *fly ash* lebih sedikit, hal ini akan meningkatkan kekuatan tekan dari material. (Van Jaarsveld, 1999)

Palomo, Grutzeck, dan Blanco (1999) mempelajari pengaruh temperatur, waktu dan rasio larutan alkali *fly ash* pada kekuatan tekan material geopolimer. Dilaporkan bahwa faktor temperatur dan waktu perawatan mempengaruhi kekuatan tekan material geopolimer tersebut. Penggunaan larutan natrium hidroksida (NaOH) dan larutan natrium silikat (Na_2Si_3) merupakan solusi dalam menghasilkan kekuatan tekan yang paling tinggi. Kuat tekan dapat mencapai hingga 60 MPa jika di-*curing* pada suhu 85°C selama 5 jam.

Xu dan van Deventer (2000) meneliti proses geopolimerisasi dari 15 unsur alami Al-Si. Telah ditemukan bahwa mineral dengan tingkat disolusi yang tinggi akan menghasilkan kuat tekan lebih baik setelah proses polimerisasi. Persentase dari kalsium dioksida (CaO), kalium dioksida (K_2O), rasio molaritas Si-Al pada

fly ash, jenis larutan alkali dan rasio molaritas Si/Al di dalam larutan alkali selama proses disolusi merupakan faktor – faktor penting yang mempengaruhi kuat tekan dari material geopolimer.

Swanepoel dan Strydom (2002) melakukan suatu penelitian tentang geopolimer yang diproduksi dengan pencampuran *fly ash*, kaolin, larutan natrium silikat, NaOH dan air. Kedua faktor waktu dan temperatur masa curing mempengaruhi kuat tekan tersebut, dan kekuatan optimum terjadi ketika material di-*curing* pada suhu 60° C selama 48 jam.

Van Jaarsveld, van Deventer dan Lukey (2002) mempelajari hubungan timbal balik dari berbagai parameter yang mempengaruhi kekuatan material geopolimer berbahan dasar *fly ash*. Mereka melaporkan bahwa properti material geopolimer dipengaruhi oleh proses disolusi yang tidak sempurna. Jumlah air, waktu dan temperatur masa *curing* mempengaruhi properti material geopolimer, khususnya faktor temperatur saat di-*curing* mempengaruhi kuat tekan material tersebut. Ketika benda uji di-*curing* pada suhu 70° C selama 24 jam, terjadi suatu peningkatan kuat tekan. *Curing* untuk suatu periode yang lebih lama justru mengurangi kuat tekan material.

Palomo et. al (2004) menyelidiki karakteristik mekanis dari beton geopolimer berbahan dasar *fly ash*. Ditemukan bahwa karakteristik material kebanyakan ditentukan oleh metode *curing*, terutama faktor waktu dan temperature masa *curing*.

2.2.1 Material Penyusun

Material polimer anorganik alkali aluminosilikat dapat disintesis (dibuat) dari prekursor yang mengandung alumina dan silika berkonsentrasi tinggi. Prekursor adalah bahan utama dalam pembentuk polimer. 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 seperti pasta semen. Prekursor dan aktivator akan bersintesa membentuk material padat melalui proses polimerisasi, dimana proses polimerisasinya yang terjadi adalah disolusi dan 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, sedemikian hingga struktur dan properti dari polimer anorganik telah tersintesis, tergantung pada proses aktivasi dan proses ikat.

Hal penting yang berkaitan dengan sintesis polimer anorganik adalah derajat polimerisasinya, dimana hal ini menentukan formasi struktur dan sedemikian hingga menentukan karakteristik akhir dari benda uji.

Sebagaimana dijelaskan oleh persamaan polimer di bawah :

dimana :
$$Mn \left[-(Si-O_2)_z - Al-O \right]_n \cdot wH_2O$$

M : elemen alkali

n : derajat polimerisasi

z : 1, 2, dan 3

- : simbol ikatan

Dalam hal penggunaan material polimer sebagai bahan pengikat pada beton, maka hal yang perlu diperhatikan adalah ikatan yang dihasilkan antara material polimer dengan agregat (*interface*). Ikatan tersebut dapat berupa ikatan mekanis ataupun ikatan kimia. Ikatan kimia dapat pula terjadi apabila matriks yang digunakan adalah polimer, walaupun sebagaimana kita ketahui bahwa mineral agregat akan bersifat tidak reaktif (*inert*) pada beton semen. Selain memberikan ikatan, material polimer juga diharapkan memberikan sumbangan kekuatan pada beton. (M. E. Suryatriyastuti, 2008)

Dalam penelitian ini akan dibuat geopolimer alkali aluminosilikat yang berasal dari prekursor yang mengandung alumina dan silika dengan aktivator larutan alkali-silikat.

2.2.1.1 Prekursor

Bahan mentah (*raw materials*) atau prekursor, yang digunakan untuk membentuk geopolimer dapat berupa mineral aluminosilikat alami seperti lempung atau limbah industri. Tanah lempung perlu dikalsinasi (*calcined*) pada suhu sekitar 650° C sebagai pengolahan awal untuk sintesis geopolimer. Karena

jumlahnya yang berlimpah, lempung telah digunakan di banyak negara sebagai bahan baku membuat bata, gerabah, keramik, perkerasan jalan dan lainnya. Limbah industri yang memiliki banyak kandungan alumina dan silika dapat digunakan sebagai prekursor. Limbah industri yang termasuk ke dalam klasifikasi ini diantaranya adalah *blast furnace slag*, abu terbang (*fly ash*), serbuk granit dan lumpur merah (*red mud*). Aluminosilikat dalam bentuk butiran kaca (*metastable glassy form*) dapat bersifat sebagai pengikat ketika diaduk dengan aktivator, yang biasanya berupa larutan alkali-silikat. Sebagai bahan pengikat untuk beton, geopolimer alkali aluminosilika memiliki perbedaan dengan semen portland, baik dalam mekanisme pengikatan juga dalam sifat teknis (*engineering properties*) produk akhir.

Pada penelitian ini akan digunakan dua macam prekursor yaitu abu terbang (*fly ash*) dan metakaolin. Berikut mengenai penjelasan dari kedua prekursor tersebut:

a. *Fly ash*

Fly ash merupakan hasil samping pembakaran batu bara yang terdapat di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). *Fly ash* mengandung silikon dioksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3) dan besi oksida (Fe_2O_3) serta oksida-oksida lain, diantaranya CaO , MgO , SO_3 , K_2O , Na_2O , TiO_2 , dan P_2O_5 . Ukuran partikel *fly ash* antara 0.5 –100 μm .

Tabel 2. 2 Jenis *fly ash*

Kandungan dan Sifat	Jenis Fly Ash	
	Tipe F	Tipe C
SiO_2 dan $\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ min, %	70.0	50.0
CaO , %	< 10	> 10
SO_3 , max, %	5.0	5.0
Kelembaban, max, %	3.0	3.0
Loss On Ignition, %	6.0	6.0

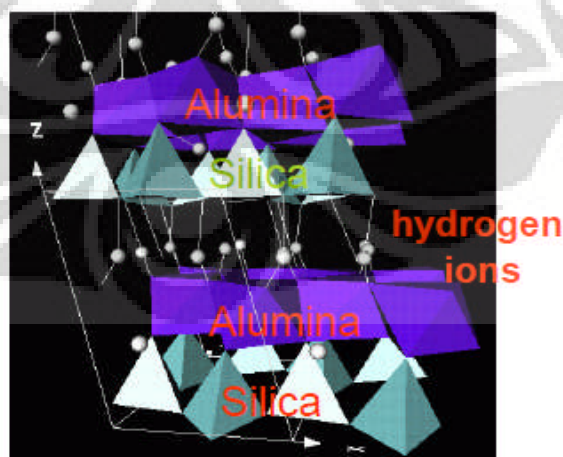
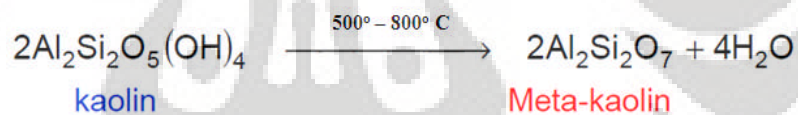
Fly ash hasil pembakaran batu bara sub-bituminous disebut *fly ash* ASTM jenis C yang tinggi kandungan kapur (lime)nya (lebih dari 10%). *Fly ash* dari batu bara bituminous dan antrasit disebut *fly ash* ASTM jenis F yang mengandung kurang 10% CaO serta mengandung 80-85 % alumina dan silika

(Heidrich, 2002; Mulyono, 2004). Komposisi dari masing-masing jenis *fly ash* dapat dilihat pada tabel 2.2 diatas.

b. Metakaolin

Metakaolin (MK) adalah bahan pozzolanic, diperoleh dengan proses dehidroksilasi dari kaolin tanah liat pada suhu antara 500° C dan 800° C. Material bahan baku dalam pembuatan metakaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) adalah kaolin tanah liat. Kaolin bersifat halus, putih, dan merupakan mineral utama dalam pembuatan porselen. Sebagian besar senyawa penyusun dari metakaolin adalah SiO_2 and Al_2O_3 .

Proses dehidroksilasi kaolin merupakan proses pelepasan ikatan $-\text{OH}$ pada senyawa kaolin $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ atau $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ menjadi senyawa metakaolin agar bersifat amorphous sehingga prekursor dapat bereaksi dengan aktivator NaOH dan Na_2SiO_3 . *Dehydroxylation* mengarah untuk meruntuhkan atau memecah struktur kisi kristal membentuk fase transisi dengan reaktivitas tinggi. Memutuskan ikatan AlO_2 dengan SiO_2 menjadi senyawa amorphous dari Al dan Si seperti yang terlihat pada ilustrasi pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Ikatan alumina dan silika

Metakaolin adalah 99,9% berbutir lebih halus dari 16 μm , dan memiliki ukuran partikel rata-rata dari 3 μm .

2.2.1.2 Aktivator

Sebagaimana telah dijelaskan di atas, aktivator dibutuhkan untuk reaksi polimerisasi monomer alumina dan silika. Alkali mengaktifkan prekursor dengan mendissolusikan mereka ke dalam monomer $[\text{SiO}_4]$ dan $[\text{AlO}_4]$. Selama proses curing, monomer – monomer tadi terkondensasi dan membentuk jaringan polimer tiga-dimensi yang berikatan silang. Ion alkali bertindak sebagai penetral muatan (*charge balancer*) untuk tiap molekul tetrahedron $[\text{AlO}_4]$.

Larutan sodium silikat (*waterglass*) adalah aktivator yang secara umum digunakan karena mudah didapat dan ekonomis. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan digunakan sodium silikat dan sodium hidroksida. Penambahan aktivator sodium hidroksida bertujuan untuk menambah ion Na^+ pada proses polimerisasi. Kandungan sodium silikat menyediakan kation berikatan-valensi-satu (*monovalent*) $[\text{Na}^+]$ sebagai spesies aktivator dimana ion resiprokal-nya Si^{4+} , adalah komposisi utama geopolimer. Sodium silikat terlarut dalam air, menyediakan lingkungan reaksi cairan-padatan yang ideal untuk pencernaan dan pelarutan material prekursor.

2.2.2 Polimerisasi

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.

Geopolymer dapat berupa salah satu dari 3 bentuk formula di bawah ini (Davidovits, 1999):

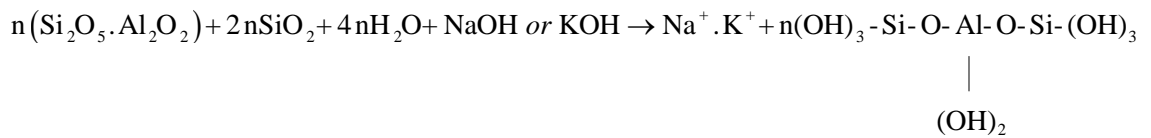
- Poly (sialate), formula monomer $[-\text{Si-O-Al-O-}]$
- Poly (sialate-siloxo), formula monomer $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-}]$
- Poly (sialate-disiloxo), formula monomer $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-}]$

(*sialate = silicon-oxo-aluminate, siloxo = silicon-oxo*)

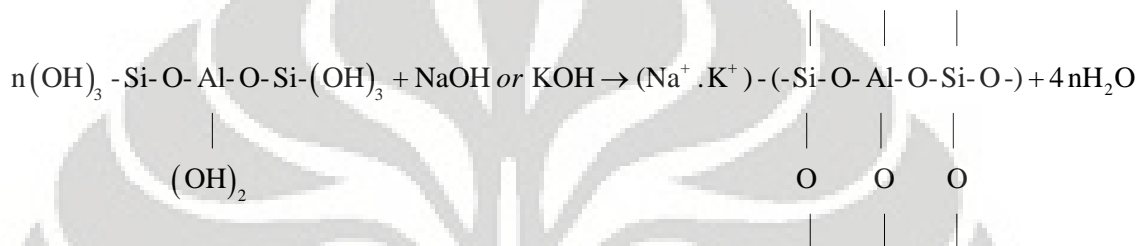
Reaksi kimia yang terjadi pada proses polimerisasi terbagi dalam 3 tahapan (H.Xu dan van Deventer, 2000). Ketiga tahap di bawah ini dapat saling bergantian dan terjadi bersamaan, membuat ini menjadi sulit ditelaah secara terpisah (Palomo, 1999). 3 tahap proses polimerisasi tersebut adalah :

(1) Disolusi atom Si dan Al dari sumber material prekursor disebabkan oleh ion hidroksida.

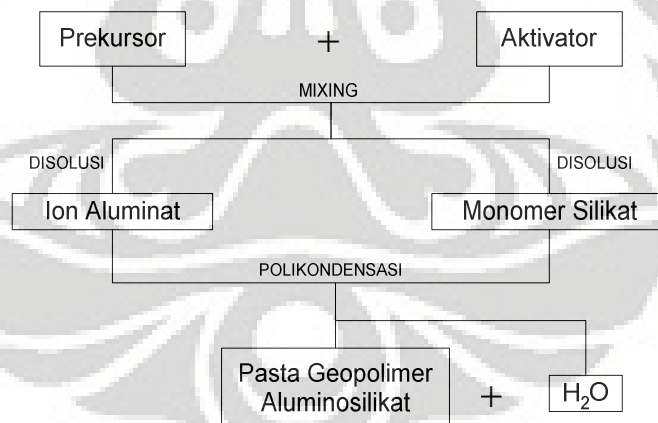
(2) Penguraian ion prekursor menjadi monomer.



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

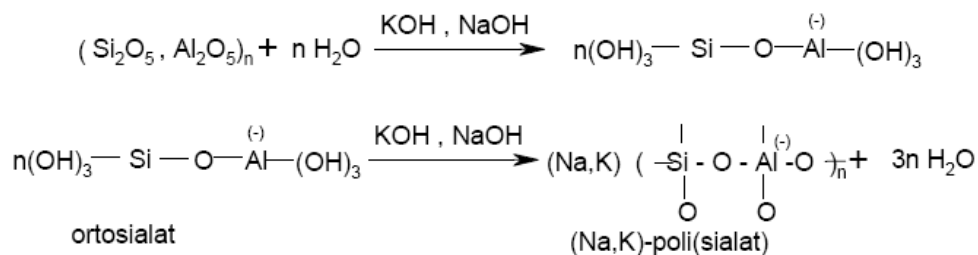


Sesuai dengan persamaan reaksi kimia (3), proses geopolimerisasi akan menghasilkan pasta geopolimer dengan hasil samping H_2O yang secara ringkas terdapat pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2. 4 Reaksi geopolimerisasi dari geopolimer

Berdasarkan reaksi kimia, proses polimerisasi dapat dilihat pada gambar 2.5



Gambar 2. 5 Reaksi polimerisasi

2.2.3 Karakteristik Beton Geopolimer

Beton geopolimer adalah beton yang terbuat dari material geopolimer sebagai matriks dan mineral agregat sebagai inklusi. Seperti halnya beton semen portland pada umumnya, penggunaan agregat berfungsi dalam memberikan sumbangan kekuatan yang terbesar pada beton. Agregat yang digunakan pada beton pada umumnya memiliki gradasi yang menerus, mulai dari agregat berukuran 37.5 mm sampai 0.15 mm. Hal ini bertujuan agar terjadi komposisi yang padat pada saat beton telah mengeras. Agregat dengan ukuran kasar (*coarse aggregate*) adalah proporsi yang terbanyak dalam beton, diikuti dengan agregat halus (*fine aggregate*). (M. E. Suryatriyastuti, 2008)

Fungsi agregat kasar adalah sebagai penyusun kekuatan, sedangkan agregat halus lebih berfungsi sebagai pengisi ruang kosong. Dalam praktek, agregat halus bekerja dengan bahan matriks membentuk suatu mortar yang melingkupi seluruh permukaan agregat kasar dan memberikan sifat *adhesive* antara inklusi lainnya.

Fungsi agregat halus sangatlah penting dalam mengurangi void pada beton, pada beberapa kasus dapat digunakan juga material pengisi (*filler*) yang berukuran mikron seperti *fly ash*. Dengan terisinya pori-pori pada beton, maka kemungkinan rangkai dapat dikurangi.

2.2.3.1 Ikatan Matriks – Inklusi

Beton adalah material yang disusun dari matriks dan inklusi. Bahan matriks berfungsi sebagai *adhesif* bagi material inklusi, sehingga membentuk ikatan antara agregat kasar dengan pasta matriks. Ikatan yang terjadi antara matriks dan inklusi dapat bersifat mekanis ataupun kimia.

1) Ikatan Mekanis

Pada beton semen, pasta semen bercampur dengan pasir membentuk mortar. Mortar inilah yang mengisi void antar agregat kasar sembari menyelimutinya.

Agregat kasar yang baik digunakan untuk beton adalah yang memiliki permukaan kasar dan bentuk kubikal, agregat yang seperti ini akan saling mengunci (*interlocking*) sehingga menyusun kekuatan yang lebih besar.

Pada beton dengan gradasi agregat yang baik, terdapat keseimbangan antar jumlah agregat halus dengan agregat kasar. Namun bagaimanapun juga, keseimbangan tersebut bergantung pada beberapa faktor, seperti ukuran maksimum partikel, bentuk partikel, kandungan semen, metode pemadatan dan kehalusan dari pasir.

Dalam rangka membuat pendekatan secara numerik, sebuah analisa sederhana tentang struktur internal makro beton keras dibuat dengan melakukan pengamatan terhadap ikatan (*intercepts*) antara lapisan mortar dengan agregat kasar. Semakin besar gradasi rata-rata agregat, semakin kecil ikatan yang terjadi, tergantung pada tebal selimut mortar yang menyelimuti partikel agregat.

Berdasarkan pada hasil pengujian di dapat beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Ikatan mortar rata-rata minimum pada beton umum (beton dengan agregat kasar dan halus yang bergradasi kontinu dan dengan kandungan semen menengah) adalah 3.5 mm.
2. Kriteria ini dianggap valid, bukan hanya untuk beton dengan batu pecah, tapi juga untuk agregat alami. Lebih lanjut kriteria ini tampaknya bersifat independen terhadap bentuk partikel agregat.

Ikatan mekanis yang terjadi pada struktur internal beton semen dapat pula terjadi pada beton geopolimer, mengingat material geopolimer bersifat *adhesive*. Ikatan yang dihasilkan oleh geopolimer akan sangat berpengaruh pada kekuatan beton.

Beberapa parameter yang berkaitan dengan penyusunan kekuatan mekanik beton geopolimer adalah sebagai berikut :

- Kemampuan geopolimer mengikat agregat kasar.
- Kemampuan geopolimer memasuki void antar agregat dan membuat selimut agregat (*interception ability*).
- Kemampuan geopolimer (*inner strength*) dalam menahan tekanan dan tarikan/lentur.

2) Ikatan Kimia

Pada beton semen, walaupun mineral agregat bersifat tidak reaktif (*inert*), terkadang terdapat kandungan substansi yang berbahaya bagi beton apabila hadir dalam kadar yang berlebihan. Substansi tersebut dinamakan material perusak (*deleterious material*).

Material perusak sering muncul pada partikel yang lebih kecil dari saringan No. 200. Kandungan maksimum yang diperbolehkan tergantung pada tujuan penggunaan beton, komposisi perusak, dan tergantung pada kehadiran pengganggu apakah terdispersi dalam agregat (sebagai gumpalan atau menyelimuti agregat). Pada beton semen, salah satu reaksi kimia yang timbul adalah antara material perusak (yang terdapat pada agregat) dengan alkali semen portland dalam kelembaban tertentu. Reaksi seperti ini dapat menyebabkan keretakan (*cracking*) pada beton melalui ekspansi yang berlebihan. Retak ini disebabkan oleh pengembangan atau ekspansi gel yang mengandung sodium dan potassium silika. Ekspansi yang dihasilkan pada beton dapat melebihi 0.5 % dan retak dapat selebar 25 mm. Kasus yang sering terjadi adalah reaksi alkali-silika, ketika semen bereaksi dengan partikel bersilika.

Ekspansi ini dapat dicegah atau dikurangi dengan beberapa cara. Misalnya dengan menggunakan semen dengan kandungan alkali rendah, atau dengan menggantikan sejumlah semen dengan pozolan. Secara umum, reaksi kimia perusak (*deleterious chemical reaction*) yang terjadi adalah antara alkali semen.

Pada beton geopolimer, reaksi polimerisasi adalah polikondensasi membentuk aluminosilikat. Apabila dibandingkan dengan reaksi perusak di atas, maka proses polimerisasi geopolimer memiliki kemiripan, dimana sejumlah Si dan Al terdisolusi dengan alkali aktivator membentuk monomer-monomer. Monomer-monomer tadi akan terkondensasi membentuk jaringan tetrahedral -Si-O-Al-O-Si- dan -Si-O-Si-.

Oleh sebab mineral agregat bersifat tidak reaktif, maka dapat dibuat hipotesa bahwa antara polimer dengan agregat tidak akan terjadi reaksi kimia. Namun, apabila terdapat kandungan material perusak pada agregat, maka akan ada kemungkinan terjadi disolusi material perusak oleh alkali-aktivator, karena kandungannya yang terdiri dari lempung (*clay consist of metakaolin*). Karena

jumlahnya yang sedikit, maka reaksi tersebut tidak akan mengganggu bahkan sebaliknya dapat menambah ikatan polimer selain dari monomer prekursor *fly ash*.

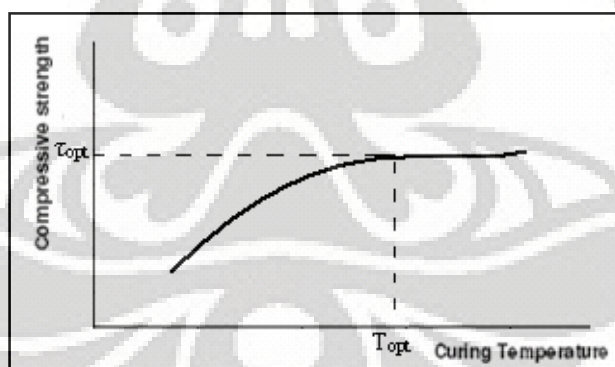
2.2.3.2 Kekuatan Mekanis

Kekuatan mekanis yang akan dibahas pada penelitian ini adalah kuat tekan. Kekuatan mekanis tersebut disusun oleh material geopolimer dan mineral agregat. Beberapa hal yang mempengaruhi kekuatan beton keras diantaranya : kekuatan agregat, kekuatan geopolimer, susunan agregat, serta ikatan geopolimer dengan agregat.

Faktor penting yang mempengaruhi kekuatan mekanis beton geopolimer diantaranya suhu ikat, waktu ikat, tipe alkali aktivator, kadar air dan jumlah relatif Si, Al, dan Na.

1) Suhu Ikat dan Waktu Ikat

Berdasarkan gambar 2.6, Semakin lama waktu ikat dan semakin tinggi suhu ikat akan memperkuat kuat tekan dari beton, walaupun pada beberapa penelitian kenaikan kuat tekan tidak signifikan untuk suhu ikat diatas 60°C dan waktu ikat lebih dari 48 jam. Kuat tekan geopolimer berbahan dasar *fly ash* yang diperkeras pada suhu 60°C dan waktu ikat 24 jam adalah sekitar 60 MPa.

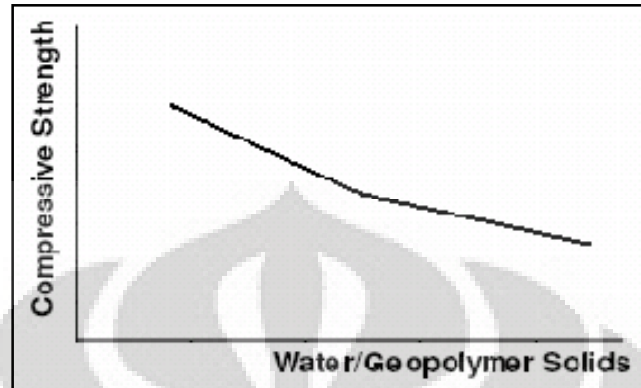


Gambar 2. 6 Pengaruh Suhu Ikat Terhadap Kuat Tekan
(M.E.Suryatriyastuti, Skripsi, 2008)

2) Kadar Air

Beberapa eksperimen mengenai geopolimer berbahan dasar *fly ash* menemukan bahwa rasio molar H_2O dengan Na_2O pada campuran adalah parameter signifikan yang mempengaruhi kuat tekan beton. Kenaikan rasio molar $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ menyebabkan turunnya kuat tekan, dapat dilihat pada gambar 2.7. Namun sama halnya dengan beton semen, kondisi ini memberikan workabilitas

yang baik. Sebagai catatan, total kandungan air dalam beton geopolimer adalah massa air yang terkandung pada larutan alkali-aktivator (sodium silikat dan sodium hidroksida) ditambah dengan massa air ekstra.



Gambar 2. 7 Pengaruh Kadar Air Terhadap Kuat Tekan
(M.E.Suryatriyastuti, Skripsi, 2008)

3) Jumlah Si, Al, dan Na

Jumlah Si, Al dan Na dalam hal ini berpengaruh pada jumlah dan kerapatan monomer yang terkondensasi. Semakin rapat monomer yang terbentuk, maka akan semakin padat beton geopolimer, sehingga meningkatkan kuat tekan.

4) Jenis alkali aktivator

Jenis alkali aktivator berpengaruh dalam proses disolusi, apabila tidak terdapat cukup grup OH maka tangan monomer berinti-Si akan sedikit, sehingga akan mengurangi kemungkinan terjadinya ikatan dengan anion Al.

2.2.3.3 Ketahanan Kimia

Beton semen memiliki sifat rapuh terhadap serangan kimia sebagaimana mineral agregat yang dikandungnya. Biasanya serangan yang terjadi adalah reaksi yang menyerang kalsium-hidroksida bebas pada beton selama fase hidrasi semen portland. Sebagai contoh, serangan oleh sulfat yang terkandung dalam air atau oleh gula. Asam akan merusak agregat dan juga pasta semen.

Berdasarkan penelitian tentang material geopolimer, disebutkan bahwa material tersebut memiliki karakteristik yang luar biasa terhadap ketahanan serangan asam. Hardjito Djiwantoro, dkk. (2004) melaporkan, geopolimer berbahan dasar *fly ash* menunjukkan ketahanan terhadap serangan sulfat setelah benda uji direndam dalam larutan sodium sulfat (Na_2SO_4) berkadar 5 % selama 12 minggu. Setelah

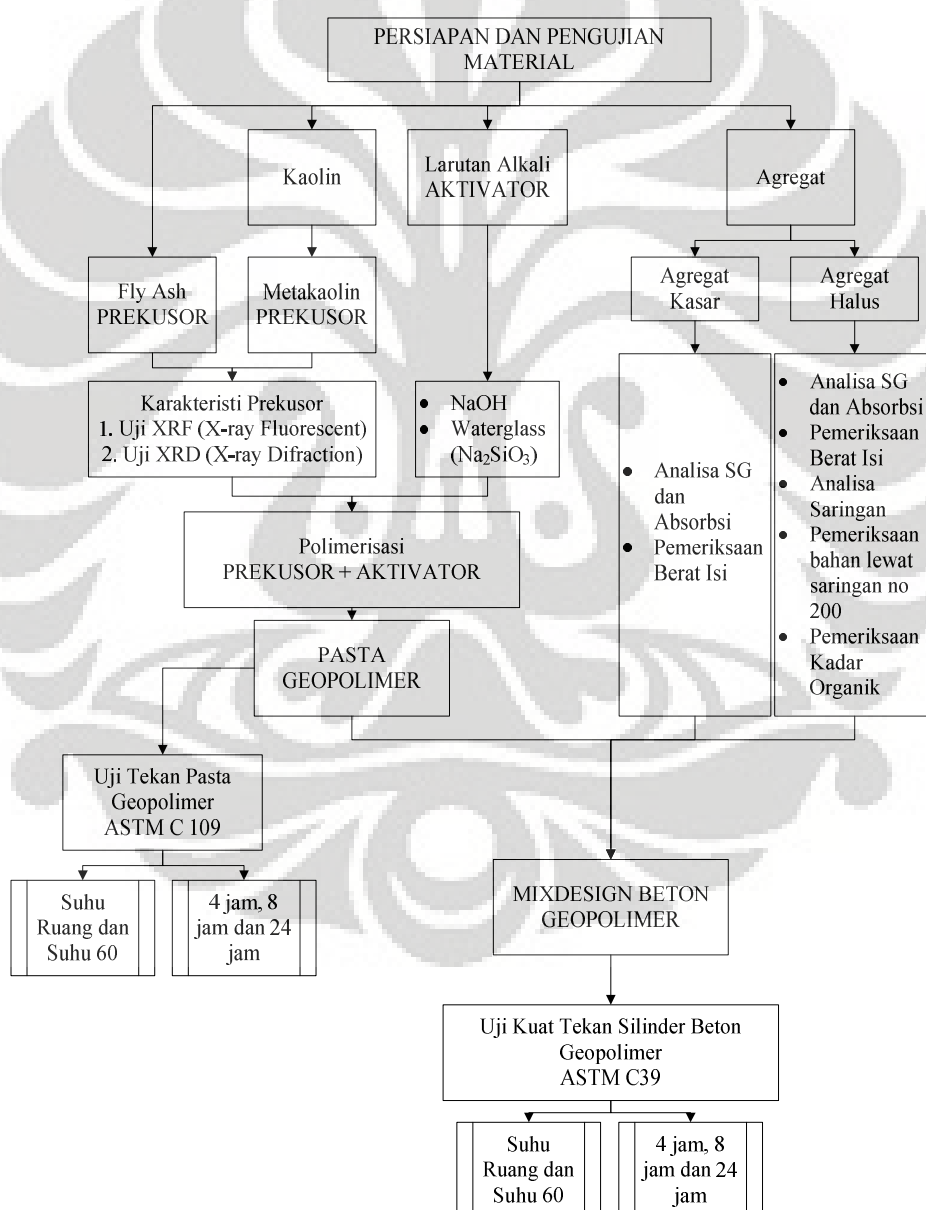
diberi perlakuan tersebut, tercatat tidak terdapat perubahan yang signifikan pada kuat tekan, massa dan dimensi.



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Pada penelitian ini akan digunakan sampel pasta $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ dan sampel beton geopolimer silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. dalam proses pembuatan sampel harus melalui tahapan-tahapan pengujian untuk material yang digunakan. Secara ringkas, proses pembuatan sampel sampai melakukan uji dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

Sampel pasta geopolimer di uji tekan pada sampel kubus $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 3 buah tiap parameter suhu dan waktu curing. Total sampel untuk uji tekan kubus ini sebanyak 36 sampel. Untuk beton geopolimer total sampel sama dengan sampel pasta karena sampel ini digunakan untuk melihat hubungan kuat tekan pasta dengan beton geopolimer. Total sampel uji pada penelitian ini secara lengkap dapat dilihat pada tabel 3.1 dibawah ini;

Tabel 3. 1 Jumlah sampel uji

No	Sampel	Prekursor	Parameter		Jumlah sampel
			Suhu	Waktu (jam)	
1	PASTA GEOPOLIMER 5X5X5 cm	Metakaolin	60 ⁰ C	4	3
2				8	3
3				24	3
4			Ruang	4	3
5				8	3
6				24	3
1		<i>Fly ash</i>	60 ⁰ C	4	3
2				8	3
3				24	3
4			Ruang	4	3
5				8	3
6				24	3
Total Sampel					36
No	Sampel	Prekursor	Parameter		Jumlah sampel
			Suhu	Waktu (jam)	
1	BETON SILINDER d= 15 cm t=30 cm	Metakaolin	60 ⁰ C	4	3
2				8	3
3				24	3
4			Ruang	4	3
5				8	3
6				24	3
1		<i>Fly ash</i>	60 ⁰ C	4	3
2				8	3
3				24	3
4			Ruang	4	3
5				8	3
6				24	3
Total Sampel					36

3.2 Standar Pengujian

Semua prosedur pengujian yang dilakukan pada penelitian ini berdasarkan standar yang berlaku yaitu *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Adapun standar pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pengujian agregat kasar dan pasir (agregat halus) meliputi:
 - a. Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar sesuai dengan ASTM C-127-04
 - b. Berat jenis dan penyerapan air agregat halus sesuai dengan ASTM C-128-04
 - c. Berat isi agregat kasar dan agregat halus sesuai dengan ASTM C-29M-97(2003)
 - d. Bahan lolos ayakan no.200 sesuai dengan ASTM C-117-04
 - e. Analisa saringan agregat kasar dan agregat halus sesuai dengan ASTM C-136-05
2. Pengujian *fly ash*, metakaolin dan sodium silikat meliputi :
 - a. Uji XRF (*X - Ray Flourescent*)
 - b. Uji XRD (*X - Ray Difraction*)
3. Pengujian kuat tekan pasta geopolimer
 Suhu pengerasan dari pasta geopolimer akan diteliti yang lebih optimal dengan suhu 60⁰ dan suhu ruang. Dan diuji kekuatan tekan pasta geopolimer pada waktu 1 jam, 4 jam, 8 jam, dan satu hari. Tujuan menguji kuat tekan pasta geopolimer ini untuk mendapatkan kuat tekan nominal dengan waktu keras tersingkat.
 Uji kuat tekan pasta geopolimer ini mengikuti ASTM C109 dengan sampel kubus 5x5x5 cm³.
4. Pengujian kuat tekan beton geopolimer
 Pengujian kuat tekan beton geopolimer sesuai dengan ASTM C 39/C 39M – 04a. Pengujian kuat tekan beton geopolimer dilakukan pada waktu 1 jam, 4 jam, 8 jam dan 1 hari dengan suhu optimal yang diberikan sesuai hasil yang didapatkan pada uji kuat tekan pasta geopolimer. Setiap pengujian diperlukan 3 buah sampel silinder t = 30 cm dan d = 15 cm.

3.3 Persiapan Dan Pengujian Material

Material – material yang akan digunakan sebagai penyusun beton untuk beton biasa ataupun beton geopolimer akan diteliti terlebih dahulu untuk mengetahui karakteristik dan unsur – unsur dari material tersebut. Material tersebut antara lain agregat dan geopolimer.

3.3.1 Agregat Halus

3.3.1.1 Analisa Specific Gravity dan Absorption

Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air meliputi penentuan berat jenis butir (*bulk specific gravity*), *apparent specific gravity*, dan penyerapan air (*absorption*) pada umumnya digunakan untuk perhitungan volume pasir yang akan dicampur dalam beton.

Alat-alat yang digunakan:

- Timbangan dengan kapasitas 1 kg dengan spesifikasi 0.1 gram
- Piknometer untuk kapasitas 500 gram pasir atau lebih
- Cetakan (*mold*) logam dengan bentuk kerucut terpancung

Persiapan percobaan:

1. Mengira-ngira 1000 gram pasir diperoleh dengan cara membagi empat (*quartering*).
2. Mengeringkan pasir di dalam oven dengan menggunakan pan dengan temperatur 100°C – 110°C selama satu hari.
3. Mengangkat pan dan dinginkan, kemudian direndam dengan air dan biarkan selama 24 ± 4 jam.
4. Dengan hati-hati menuangkan yang kelebihan untuk menghindari kehilangan butir pasir, menebarkan contoh bahan di atas permukaan rata terbuka untuk
5. Diangin-anginkan udara panas dan gerakkan berulang-ulang samapai kering secara merata. Meneruskan prosedur ini sampai contoh bahan ini mendekati keadaan mengalir bebas (*free flowing condition*).
6. Kemudian memasukkan sebagian dari pasir kering ke dalam metal *sand cone mold*, kemudian dipadatkan dengan tongkat pemadat (*tamper*) sebanyak 25 kali tumbukan, lalu angkat *mold* tersebut tegak lurus.

7. Kalau permukaan masih lembab, maka pasir akan bertahan dalam bentuk cetakan *mold*.
8. Mengeringkan terus pasir dengan gerakan tetap dan dilakukan tes berulang-ulang sampai slump pasir yang dipukul berpindah sedikit dari atas *mold*. Hal ini membuktikan bahwa pasir sudah mencapai kering permukaan SSD (*surface dry condition*) diperoleh jika cetakan diangkat, pasir akan runtuh/longsor.

Prosedur pemeriksaan:

1. Memasukkan 500 *gram* pasir dalam keadaan SSD ke dalam piknometer kemudian isi dengan air sampai 90% dari kapasitas tabung. Gelembung-gelembung udara dihilangkan dengan cara menggoyangkan piknometer. Merendam dalam air dengan temperatur air $73.4 \pm 3^{\circ}F$ selama paling sedikit 1 hari. Menentukan berat piknometer benda uji dan air.
2. Mengeluarkan pasir dari piknometer dan dikeringkan pada temperatur air $212 \pm 230^{\circ}F$ selama 1 hari.
3. Menentukan berat piknometer berisi air sesuai kapasitas kalibrasi pada temperatur air $73.4 \pm 30^{\circ}F$, dengan ketelitian 0.1 *gram*

Perhitungannya:

- Bulk Specific Gravity (SSD) : $\frac{500}{B + 500 - C}$
- Apparent Specific Gravity : $\frac{A}{B + A - C}$
- Prosentasi Absorpsi : $\frac{500 - A}{A} \times 100\%$

Keterangan:

A = Berat (gram) dari benda uji oven dry

B = Berat (gram) dari piknometer berisi air

C = Berat (gram) dari piknometer dengan benda uji dan air sesuai kapasitas kalibrasi

3.3.1.2 Pemeriksaan Berat Isi

Pemeriksaan berat isi dan gembur pasir dimaksudkan untuk mengetahui berat isi pasir dalam keadaan padat dan gembur.

Alat-alat yang digunakan:

- Timbangan dengan ketelitian 0.1 *gram*
- Talam kapasitas cukup besar untuk mengeringkan agregat
- Tongkat pemadat
- Mistar perata
- Wadah baja berbentuk silinder

Keadaan pasir kering udara: Gembur (lepas) dan padat

Prosedur percobaan:

1. Berat isi lepas
 - a. Menimbang dan mencatat beratnya (w_1).
 - b. Memasukkan benda uji dengan hati-hati agar tidak terjadi pemisahan butir-butir dari ketinggian maksimum 5 *cm* di atas wadah dengan menggunakan sendok atau sekop sampai penuh.
 - c. Meratakan permukaan benda uji dengan menggunakan mistar perata.
 - d. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta benda uji (w_2).
 - e. Menghitung berat benda uji ($w_3 = w_2 - w_1$).
2. Berat isi padat agregat dengan ukuran butir maksimum dengan cara penusukan
 - a. Menimbang dan mencatat beratnya (w_1).
 - b. Mengisi wadah dengan benda uji dalam tiga lapis yang sama tebal. Setiap lapis dipadatkan dengan tongkat pemadat sebanyak 25 kali tusukan secara merata. Pada pemadatan, tongkat harus tepat masuk sampai lapisan bagian bawah tiap-tiap lapisan.
 - c. Meratakan permukaan benda uji dengan menggunakan mistar perata.
 - d. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta benda uji (w_2).
 - e. Menghitung berat benda uji ($w_3 = w_2 - w_1$).
3. Berat isi pada agregat ukuran butir dengan cara penggoyangan

- a. Menimbang dan mencatat beratnya (w_1).
- b. Mengisi wadah dengan benda uji dalam tiga lapis yang sama tebal.
- c. Memadatkan setiap lapisan dengan cara menggoyang-goyangkan wadah sebagai berikut:
Meletakkan wadah di atas tempat yang kokoh dan datar, kemudian mengangkat salah satu sisinya kira-kira setinggi 5 cm kemudian melepaskannya. Mengulangi hal ini pada sisi yang berlawanan. Memadatkan lapisan sebanyak 25 kali untuk setiap sisi.
- d. Meratakan permukaan benda uji dengan menggunakan mistar perata.
- e. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta benda uji (w_2).
- f. Menghitung berat benda uji ($w_3 = w_2 - w_1$).

Perhitungannya:

$$\text{Berat Isi Agregat} = \frac{W_3}{V} \text{ kg / dm}^3$$

V = Isi wadah (dm^3)

3.3.1.3 Analisa Saringan Agregat Halus

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat dengan menggunakan saringan.

Alat-alat yang digunakan:

- Timbangan dan neraca dengan ketelitian 0,2 % dari benda uji.
- Satu set jaringan: 76.2 mm (3"); 63.5 mm (2¹/₂"); 50.8 mm (2"); 37.5 mm (1¹/₂"); 25 mm (1"); 19.1 mm (3/4"); 12.5 mm (1/2"); 9.5 mm (1/4"); No. 4; No. 8; No. 16; No. 30; No. 50; No. 100; No. 200 (standar ASTM).
- Oven yang dilengkapi dengan pengukur suhu untuk memanasi sampai $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$.
- Alat pemisah contoh (*Sample Splitter*).
- Mesin penggetar saringan.
- Talam-talam
- Kuas, sikat kuning, sendok, dan alat-alat lainnya.

Bahan yang digunakan:

Benda uji diperoleh dari alat pemisah contoh atau cara perempat sebanyak:

- Ukuran maksimum No. 4; berat minimum 500 *gram*.
- Ukuran maksimum No. 8; berat minimum 100 *gram*.

Benda uji disiapkan sesuai dengan prosedur, kecuali apabila butiran yang melalui saringan No. 200 tidak perlu diketahui jumlahnya dan bila syarat-syarat ketelitian tidak menghendaki pencucian.

Prosedur pemeriksaan:

1. Mengeringkan benda uji di dalam oven dengan suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, sampai berat tetap.
2. Menyaring benda uji lewat susunan saringan dengan ukuran paling besar ditempatkan paling atas, kemudian mengguncangkan saringan dengan tangan atau mesin pengguncang selama 15 menit.
3. Percobaan ini dilakukan dua atau tiga kali agar lebih akurat hasil yang didapatkan.
4. Menimbang berat agregat yang tertahan pada masing-masing saringan. Kemudian dicatat dan dihitung persentase agregat yang lolos saringan.

Untuk mendapatkan gambaran yang jelas mengenai susunan butir dari agregat, dibuat suatu gambaran secara grafik yang disebut diagram butir.

3.3.1.4 Pemeriksaan Bahan Lewat Saringan No. 200

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan jumlah bahan yang terdapat dalam agregat lewat saringan No. 200 dengan cara pencucian.

Alat-alat yang digunakan:

- Saringan No. 16 dan No. 200.
- Wadah pencucian benda uji berkapasitas cukup besar sehingga pada waktu diguncang-guncang benda uji atau air pencuci tidak tumpah.
- Oven, yang dilengkapi pengatur suhu untuk memanasi sampai $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- Timbangan dengan ketelitian 0.1 % berat contoh.
- Talam berkapasitas cukup besar untuk mengeringkan contoh agregat.

Bahan yang digunakan:

- Berat contoh agregat kering minimum tergantung pada ukuran agregat maksimum sesuai tabel 3.2

Tabel 3. 2 Ukuran Agregat Maksimum

Ukuran Agregat Maksimum		Berat Contoh Agregat Kering Minimum
<i>Mm</i>	<i>inch</i>	<i>Gram</i>
2.36	No. 8	100
1.18	No. 4	500
9.5	¼	2000
19.1	¾	2500
38.1	1½	5000

(sumber : buku pedoman praktikum laboratorium struktur dan material)

- Persiapan benda uji
 - Masukkan contoh agregat lebih kurang 1.25 kali berat benda uji ke dalam talam, keringkan dalam oven dengan suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap.
 - Siapkan benda uji dengan berat (w_1) sesuai tabel 3.1

Prosedur pemeriksaan:

1. Memasukkan benda uji ke dalam wadah, dan diberi air pencuci secukupnya sehingga benda uji terendam.
2. Menggucang-guncangkan wadah dan tuangkan air cucian ke dalam susunan saringan No. 16 dan No. 200. Pada waktu menuangkan air cucian, mengusahakan agar bahan-bahan yang kasar tidak ikut tertuang.
3. Memasukkan air pencuci baru, dan mengulang langkah sebelumnya sampai air cucian menjadi jernih.
4. Semua bahan yang tertahan saringan No. 16 dan No. 200 dikembalikan ke dalam wadah talam yang telah diketahui beratnya (w_2) dan dikeringkan dalam oven dengan suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap.
5. Setelah kering ditimbang dan dicatat beratnya (w_3).
6. Menghitung berat bahan kering tersebut ($w_4 = w_3 - w_2$)

Perhitungannya:

$$\text{Jumlah bahan lewat saringan No.200} = \frac{w_1 - w_4}{w_1} \times 100\%$$

w_1 = Berat benda uji semula (*gram*)

w_4 = Berat bahan tertahan saringan No. 200 (*gram*)

3.3.2 Agregat Kasar

3.3.2.1 Analisa Specific Gravity dan Absorption

Alat-alat yang digunakan:

- Timbangan dengan ketelitian 0.5 *gram*, dengan kapasitas maksimum 5 *kg*
- Panjang besi 8 *in* dan tinggi 2.5 *in*
- Alat penggantung keranjang
- Oven
- Handuk

Prosedur pemeriksaan:

1. Benda uji direndam 24 jam.
2. Benda uji dikeringkan dengan handuk, sehingga air permukaannya habis, tetapi harus masih tanpa lembab (kondisi SSD). Kemudian menimbang berat benda uji.
3. Benda uji dimasukkan ke dalam keranjang dan direndam kembali dalam air, kemudian digoyang-goyangkan dalam air untuk melepaskan udara yang terperangkap. Kemudian menimbang kembali kontainer yang berisi benda uji.
4. Benda uji dikeringkan pada temperatur 212 – 230°F. Didinginkan kemudian ditimbang kembali berat benda uji.

Perhitungannya:

- Bulk Specific Gravity (SSD) : $\frac{B}{B - C}$
- Apparent Specific Gravity : $\frac{A}{A - C}$
- Persentase Absorpsi : $\frac{B - A}{A} \times 100\%$

Keterangan:

A = Berat (*gram*) dari benda uji *oven-dry* di udara.

B = Berat (*gram*) dari benda uji pada kondisi SSD.

C = Berat (*gram*) dari benda uji pada kondisi jenuh.

3.3.2.2 Pemeriksaan Berat Isi

Pemeriksaan berat isi dan gembur agregat kasar dimaksudkan untuk mengetahui berat isi agregat kasar dalam keadaan padat dan gembur:

Alat-alat yang digunakan:

- Timbangan dengan ketelitian 0.1 *gram*
- Talam kapasitas cukup besar untuk mengeringkan agregat
- Tongkat pemadat
- Mistar perata
- Wadah baja berbentuk silinder

Keadaan pasir kering udara: Gembur (lepas) dan padat

Prosedur pemeriksaan:

1. Berat isi lepas
 - a. Menimbang dan mencatat beratnya (w_1).
 - b. Memasukkan benda uji dengan hati-hati agar tidak terjadi pemisahan butir-butir dari ketinggian maksimum 5 *cm* di atas wadah dengan menggunakan sendok atau sekop sampai penuh.
 - c. Meratakan permukaan benda uji dengan menggunakan mistar perata.
 - d. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta benda uji (w_2).
 - e. Menghitung berat benda uji ($w_3 = w_2 - w_1$).
2. Berat isi padat agregat dengan ukuran butir maksimum dengan cara penusukan
 - a. Menimbang dan mencatat beratnya (w_1).
 - b. Mengisi wadah dengan benda uji dalam tiga lapis yang sama tebal. Setiap lapis dipadatkan dengan tongkat pemadat sebanyak 25 kali tusukan secara merata. Pada pemadatan, tongkat harus tepat masuk sampai lapisan bagian bawah tiap-tiap lapisan.
 - c. Meratakan permukaan benda uji dengan menggunakan mistar perata.
 - d. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta benda uji (w_2).
 - e. Menghitung berat benda uji ($w_3 = w_2 - w_1$).

3. Berat isi pada agregat ukuran butir antara dengan cara penggoyangan
 - a. Menimbang dan mencatat beratnya (w_1).
 - b. Mengisi wadah dengan benda uji dalam tiga lapis yang sama tebal.
 - c. Memadatkan setiap lapisan dengan cara menggoyang-goyangkan wadah sebagai berikut:
 - Meletakkan wadah di atas tempat yang kokoh dan datar, kemudian mengangkat salah satu sisinya kira-kira setinggi 5 cm kemudian melepaskannya.
 - Mengulangi hal ini pada sisi yang berlawanan. Memadatkan lapisan sebanyak 25 kali untuk setiap sisi.
 - d. Meratakan permukaan benda uji dengan menggunakan mistar perata.
 - e. Menimbang dan mencatat berat wadah beserta benda uji (w_2).
 - f. Menghitung berat benda uji ($w_3 = w_2 - w_1$).

Perhitungannya:

$$\text{Berat Isi Agregat} = \frac{W_3}{V} \text{ kg / dm}^3$$

$V =$ Isi wadah (dm^3)

3.3.2.3 Analisa Saringan Agregat Kasar

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat dengan menggunakan saringan.

Alat-alat yang digunakan:

- Timbangan dan neraca dengan ketelitian 0.2 % dari benda uji.
- Satu set jaring: 76.2 mm (3"); 63.5 mm (2½"); 50.8 mm (2"); 37.5 mm (1½"); 25 mm (1"); 19.1 mm (¾"); 12.5 mm (½"); 9.5 mm (¼"); No. 4; No. 8; No. 16; No. 30; No. 50; No. 100; No. 200 (standar ASTM).
- Oven yang dilengkapi dengan pengukur suhu untuk memanasi sampai $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$.
- Alat pemisah contoh (*Sample Splitter*).
- Mesin penggetar saringan.
- Talam-talam
- Kuas, sikat kuning, sendok, dan alat-alat lainnya.

Bahan yang digunakan:

Benda uji diperoleh dari alat pemisah contoh atau cara perempat sebanyak:

- Ukuran maksimum 3.5"; berat minimum 35 kg.
- Ukuran maksimum 3"; berat minimum 30 kg.
- Ukuran maksimum 2.5"; berat minimum 25 kg.
- Ukuran maksimum 2"; berat minimum 20 kg.
- Ukuran maksimum 1.5"; berat minimum 15 kg.
- Ukuran maksimum 1"; berat minimum 10 kg.
- Ukuran maksimum $\frac{3}{4}$ "; berat minimum 5 kg.
- Ukuran maksimum $\frac{1}{2}$ "; berat minimum 2.5 kg.
- Ukuran maksimum $\frac{1}{4}$ "; berat minimum 1 kg.

Benda uji disiapkan sesuai dengan prosedur, kecuali apabila butiran yang melalui saringan No. 200 tidak perlu diketahui jumlahnya dan bila syarat-syarat ketelitian tidak menghendaki pencucian.

Prosedur pemeriksaan:

1. Mengeringkan benda uji di dalam oven dengan suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, sampai berat tetap.
2. Menyaring benda uji lewat susunan saringan dengan ukuran paling besar ditempatkan paling atas, kemudian mengguncangkan saringan dengan tangan atau mesin pengguncang selama 15 menit.
3. Percobaan ini dilakukan dua atau tiga kali agar lebih akurat hasil yang didapatkan.
4. Menimbang berat agregat yang tertahan pada masing-masing saringan. Kemudian dicatat dan dihitung persentase agregat yang lolos saringan.
5. Untuk mendapatkan gambaran yang jelas mengenai susunan butir dari agregat, dibuat suatu gambaran secara grafik yang disebut diagram butir.

3.3.3 Penyusun Pasta Geopolimer

Bahan geopolimer yang digunakan sebagai prekursor pada penelitian ini ada dua macam yaitu *fly ash* (abu terbang) dan metakaolin. *Fly ash* yang digunakan merupakan hasil limbah buangan dari pembakaran batu bara PLTU Suralaya. Metakaolin merupakan hasil dehidroksilasi dari material kaolin yang dibeli dari

PT Cerafill, kaolin sendiri merupakan bahan dari pembuatan keramik atau porselen. Campuran antara sodium hidroksida dan sodium silikat sebagai alkali aktivatornya.. Untuk larutan silikat, atau dikenal dengan *waterglass* dan senyawa NaOH dapat dibeli di toko kimia.

Pengujian untuk material geopolimer dilakukan terhadap *fly ash* dan metakaolin sebagai prekursor, serta sodium silikat sebagai aktivator yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik ada 2 yaitu:

1. Uji XRF (*X - Ray Fluorescent*)

Pengujian ini digunakan untuk mengetahui komposisi kimia. Analisis unsur kimia terhadap sampel akan lebih diteliti menggunakan uji ini. Dengan XRF dapat menganalisa unsur – unsur apa saja yang membangun dari prekursor atau aktivator yang digunakan.

2. Uji XRD (*X - Ray Diffraction*)

Uji ini dilakukan untuk mencari sifat struktur dari *fly ash*.

Uji ini dilakukan di Laboratorium Fisika Fakultas MIPA Universitas Indonesia

3.4 Perhitungan Campuran Beton Geopolimer

3.4.1 Perhitungan Pasta Geopolimer

Dalam menentukan mix desain campuran beton 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.

Dalam penelitian ini, penentuan komposisi pasta geopolimer menggunakan komposisi campuran penelitian sesuai skripsi M E Suryatriastuti. Karena material yang digunakan tidak sama maka akan digunakan perbandingan molar antar komposisi kimia yang didapat dari uji XRF dan XRD untuk material-material yang digunakan. Perbandingan molar dimaksudkan untuk mendapatkan komposisi massa campuran yang tepat sesuai penelitian sebelumnya.

Pada saat penelitian akan dilakukan metode *trial and error* untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal.

3.4.2 Mix Design Beton Geopolimer

Beton geopolimer pada penelitian ini memiliki target kekuatan $f_c' = 35$ MPa. Perhitungan campuran beton geopolimer di desain dengan metode mix desain seperti beton konvensional, menggunakan metode US Bureau, dengan mengganti pasta semen menjadi pasta geopolimer.

3.5 Produksi Benda Uji

3.5.1 Persiapan

Tahap ini merupakan tahap awal dalam melakukan penelitian semen geopolimer ini. Ketersediaan bahan dan peralatan menunjang keberlangsungan dari penelitian ini.

1. Persiapan peralatan
 - a. Concrete mixer, dengan volume yang akan dipakai adalah 35 dm^3
 - b. Cetakan kubus $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ untuk uji kuat tekan pasta geopolimer
 - c. Cetakan silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm
 - d. 1 set peraltan slump test
 - e. Sendok semen, wadah (baskom) dan peralatan penunjang lainnya

2. Persiapan bahan

- a. Prekursor

Bahan prekursor yang digunakan ada dua macam yaitu *fly ash* dan metakaolin. Abu terbang (*fly ash*) berasal dari penelitian sebelumnya yaitu dari PLTU Suralaya. Sebelum digunakan untuk produksi *fly ash* harus digunakan untuk mendapatkan luas permukaan yang besar. Setelah digiling, *fly ash* disaring dengan menggunakan saringan no 200. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan reaksi polimerisasi yang baik.

Metakaolin yang digunakan merupakan hasil dehidroksilasi dari kaolin. Untuk mendapatkan material metakaolin, kaolin yang ada di panaskan hingga mencapai suhu $\pm 750^\circ \text{C}$ selama ± 2 jam.

- b. Aktivator alkali

Aktivator yang digunakan pada penelitian ini adalah campuran sodium silikat (Na_2SiO_3) dengan natrium hidroksida (NaOH). Natrium hidroksida berbentuk pellet dilarutkan dalam sodium silikat

yang berbentuk cairan. Komposisi sodium hidroksida dan sodium silikat pada saat pencampuran dihitung agar didapatkan komposisi larutan dengan molaritas tertentu. Hal ini akan berpengaruh dalam reaksi polimerisasi yang terjadi.

c. Agregat

Agregat yang digunakan adalah agregat yang berasal dari PT Adhimix. Agregat pasir menggunakan pasir ex Bangka. Agregat kasar menggunakan split 10-20. Agregat-agregat tersebut nantinya akan diuji sesuai ketentuan pengujian yang sudah dijelaskan pada bagian sebelumnya.

d. Air

Air yang dipakai sesuai dengan standar yang memenuhi syarat untuk campuran pada bahan beton, yaitu dengan kualitas air minum

3.5.2 Pembuatan Pasta Geopolimer

Pasta geopolimer merupakan campuran dari larutan aktivator dan prekursor. Larutan alkali merupakan campuran dari NaOH dan sodium silikat. Prekursor terdiri dari metakaolin dan *fly ash*.

Larutan alkali dicampurkan kedalam satu wadah, dengan timbulnya kenaikan suhu pada larutan menandakan reaksi dari NaOH dan sodium silikat sudah terjadi. Untuk mendapatkan hasil campuran pasta yang baik, reaksi kenaikan suhu pada campuran aktivator tersebut harus hilang.

Setelah suhu dari larutan alkali mulai menurun dan hilang, *fly ash* atau metakaolin dimasukan kedalam larutan dan diaduk hingga merata. Campuran ini berfungsi sebagai matriks pengikat atau pasta semen dari beton geopolimer.

3.5.3 Pembuatan Beton Geopolimer

Proses pencampuran dilakukan setelah melakukan perhitungan mix desain, dimana komposisi berat tiap bahan beton ditentukan sesuai criteria perhitungan mix desain. Proses pencampuran meliputi kegiatan:

- a. Mencampur agregat kasar dan halus dalam keadaan kering. Dan memasukan hasil campuran ke dalam *concrete mixer*.

b. Memasukan pasta geopolimer tersebut kedalam *concrete mixer* dan mengaduk sampai merata.

c. Melakukan tes slump

Pengecekan slump bermaksud untuk mengukur kekentalan dari adukan beton geopolimer yang dihasilkan pada setiap proses pengadukan. Kekentalan beton akan mempunyai pengaruh pada tingkat *workability* dari beton. Adukan beton untuk keperluan pengujian ini harus diambil langsung dari mesin pengaduk.

Peralatan yang digunakan :

- Tongkat baja berdiameter 16 mm dan panjang 60 mm dengan ujung yang dibulatkan
- Pelat baja sebagai alat cetakan, perata dan penggaris
- Kerucut abrams

Proses pengujian :

- Alat-alat yang akan digunakan pada pengujian ini sebelumnya dibasahi permukaannya untuk menghindari penyerapan air pada bagian alat
- Kerucut diletakkan di atas pelat atau bidang rata diikuti dengan menekan ke bawah pada penyokong-penyokongnya
- Adukan beton geopolimer secara perlahan diisikan ke dalam kerucut dalam 3 lapis yang sama tebalnya dan setiap lapis ditusuk-tusuk dengan menggunakan tongkat baja sebanyak 25 kali
- Bidang bagian atas diratakan dan dibiarkan selama 30 detik
- Kerucut ditarik vertikal ke atas dengan perlahan
- Setelah itu ukur penurunan kerucut terhadap penurunan semula
- Hasil pengukuran ini disebut slump dan merupakan ukuran dari kekentalan adukan beton tersebut.

3.6 Pengujian Sampel

3.6.1 Uji Kuat Tekan Pasta Geopolimer

Kuat tekan pasta geopolimer diujikan untuk 2 campuran yang berbeda dalam prekusornya, campuran pertama menggunakan prekusor *fly ash* dan aktivator

NaOH dan sodium silikat, untuk campuran kedua menggunakan prekursor metakaolin dengan aktivator yang sama.

Kuat tekan dilakukan untuk mencari waktu optimal untuk mendapatkan kuat tekan beton maksimal beton geopolimer. Suhu yang akan dibandingkan adalah 60⁰ dan suhu ruang dengan menggunakan oven pemanas yang ada di Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dengan uji kuat tekan pada waktu 4 jam, 8 jam dan 24 jam. Sampel yang digunakan berbentuk kubus 5x5x5 cm³ dengan lapisan plastik pada sisi dalam kubus.

3.6.2 Uji Kuat Tekan Beton Geopolimer

Uji kuat tekan beton merupakan tahap lanjutan dari uji kuat pasta geopolimer. Perilaku yang diuji sama seperti uji pasta geopolimer yaitu membandingkan proses hardening dari beton geopolimer pada suhu 60⁰ celcius dan suhu ruang dengan waktu uji yang sama yaitu 4 jam, 8 jam dan 24 jam.

Prosedur pengujian kuat tekan bertujuan untuk mendapatkan nilai f_c' , yaitu kuat tekan yang disyaratkan. Tahapannya adalah sebagai berikut

- a. Menimbang dan mencatat berat uji, kemudian bagian atas permukaan benda uji yang kasar diberi lapisan belerang (capping) yang bertujuan meratakan permukaan beton
- b. Setelah lapisan belerang mengeras, benda uji diletakkan pada mesin/ alat penekan dan posisinya diatur agar tepat berada di tengah-tengah pelat penekan.
- c. Pembebanan dilakukan perlahan-lahan secara kontinu dengan mesin hidraulik sampai benda uji mengalami kehancuran (jarum penunjuk berhenti kemudian salah satunya bergerak turun)
- d. Catat beban maksimum yang ditunjukkan oleh jarum penunjuk

BAB 4 PEMBAHASAN DAN ANALISA

4.1 Pengujian Prekursor dan Aktivator

4.1.1 Pengujian Prekursor

Fly ash sebagai bahan dasar (prekursor) pembentuk geopolimer diuji dengan tes XRF (*X - Ray Fluorescent*). Seperti dijelaskan pada sub bab 3.3.3, uji XRF untuk mengetahui komposisi kimia penyusun *fly ash*, dimana diharapkan sebagian besar senyawa yang terkandung pada *fly ash* yang digunakan adalah Al_2O_3 dan SiO_2 . *Fly ash* yang digunakan berasal dari PLTU surabaya.

Uji XRF dilakukan di laborataorium MIPA Universitas Indonesia Salemba. Komposisi kimia *fly ash* terdapat pada table berikut:

Tabel 4. 1 Komposisi kimia *fly ash* hasil uji XRF

Komposisi Kimia	% Berat
Al_2O_3	25.26
SiO_2	47.2992
S	0.2969
K_2O	0.7009
CaO	5.1482
TiO_2	1.7579
MnO	0.1238
SrO_2	0.1743
Fe_2O_3	16.5277
MgO	2.7074

Prekursor yang lain yaitu metakaolin memiliki komposisi kimia sebagai berikut;

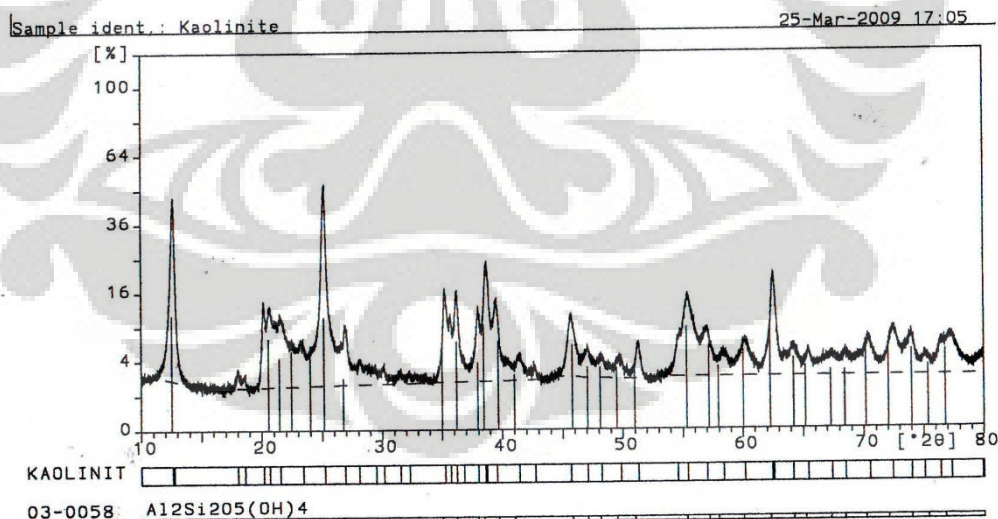
Tabel 4. 2 Komposisi kimia metakaolin hasil uji XRF

Komposisi Kimia	% Berat
Al_2O_3	42.3029
SiO_2	55.1546
K_2O	1.2419
TiO_2	0.2068
V_2O_3	0.0037
Fe_2O_3	1.0902

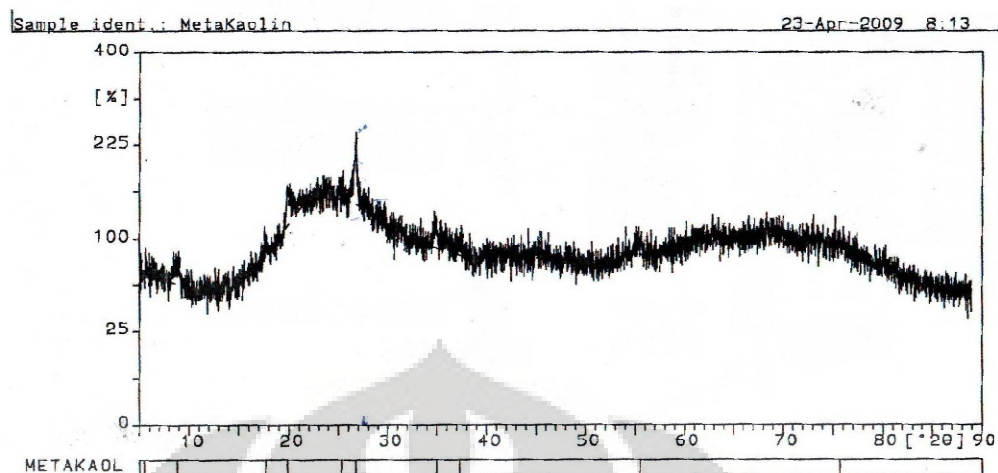
Pada uji xrf menunjukkan kandungan dari alumina dan silika pada kedua prekursor cukup tinggi. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal dari pasta geopolimer tersebut, maka sebelum digunakan *fly ash* dan metakaolin diambil butiran terhalus (lolos saringan 200).

Metakaolin merupakan hasil dari pelepasan ikatan $-OH$ pada kaolin atau dikenal dengan dehidroksilasi kaolin. Dehidroksilasi didapatkan dengan pemanasan kaolin pada suhu antara $500 - 800$ °C. pada penelitian ini kaolin dipanaskan pada suhu 750° celcius selama 2 jam. Metakaolin dipanaskan agar sifat kristal pada kaolin menjadi bersifat amorphous sehingga reaktif terhadap aktivator. Sifat kristal dan amorphous pada kaolin dan metakaolin dapat ditunjukkan dengan uji XRD. Uji XRD merupakan uji yang dilakukan untuk mengetahui sifat struktur pada material.

Pada gambar 4.1 merupakan gambar dimana kaolin masih bersifat Kristal yang ditunjukkan dengan banyaknya *peak* atau puncak pada grafik uji tersebut. Gambar 4.2 menunjukkan kaolin yang sudah dipanaskan selama 2 jam menjadi kaolin. Pada grafik tersebut kaolin sudah bersifat amorphous sehingga sudah berubah menjadi metakaolin.



Gambar 4. 1 Hasil XRD kaolin



Gambar 4. 2 Hasil XRD metakaolin

4.1.3 Pengujian *Waterglass* (Na_2SiO_3)

Komposisi kimia dari *waterglass* berdasarkan uji XRF adalah sebagai berikut;

Tabel 4. 3 Komposisi kimia hasil uji XRF

No	Komposisi Kimia	% Berat
1	Na_2O	16.7936
2	SiO_2	83.0679
3	TiO_2	0.0665
4	Fe_2O_3	0.072

Berdasarkan uji XRF pada tabel 4.3 tersebut dapat dilihat sebagian besar senyawa yang terkandung pada *waterglass* yang digunakan adalah Na_2O dan SiO_2 . Kandungan air pada *waterglass* harus diperhitungkan dengan cara memanasi *waterglass* pada suhu $\pm 60^\circ \text{C}$ didalam oven sampai beratnya tetap. Tujuannya agar air pada *waterglass* dapat diperhitungkan sehingga air yang digunakan tidak berlebihan pada campuran pasta geopolimer.

4.2 Pengujian Agregat Halus

4.2.1 Berat Jenis dan Penyerapan

Berdasarkan pengujian di laboratorium sesuai ASTM C-128-04 , didapatkan berat jenis curah (Bulk Specific Gravity) sebesar 2,57; berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) sebesar 2,59; berat jenis semu (Apparent Specific Gravity) sebesar 2,64; dan penyerapan (adsorpsi) sebesar 1,02%. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 4.4

Tabel 4. 4 Nilai *specific gravity* pasir putih Bangka

	I	II	Rata-Rata	Satuan
Berat benda uji <i>oven dry</i>	544.2	495.2	519.7	gr
Berat piknometer berisi air	677.5	677.5	677.5	gr
Berat piknometer dengan benda uji dan air ses	1015	985.1	1000.05	gr
Berat jenis curah (<i>Bulk Specific Gravity</i>)	2.56	2.57	2.57	gr/cm ³
Berat jenis jenuh kering permukaan (SSD)	2.59	2.60	2.59	gr/cm ³
Berat jenis semu (<i>Apparent Specific Gravity</i>)	2.63	2.64	2.64	gr/cm ³
penyerapan (<i>Absorpsi</i>)	1.07	0.97	1.02	%

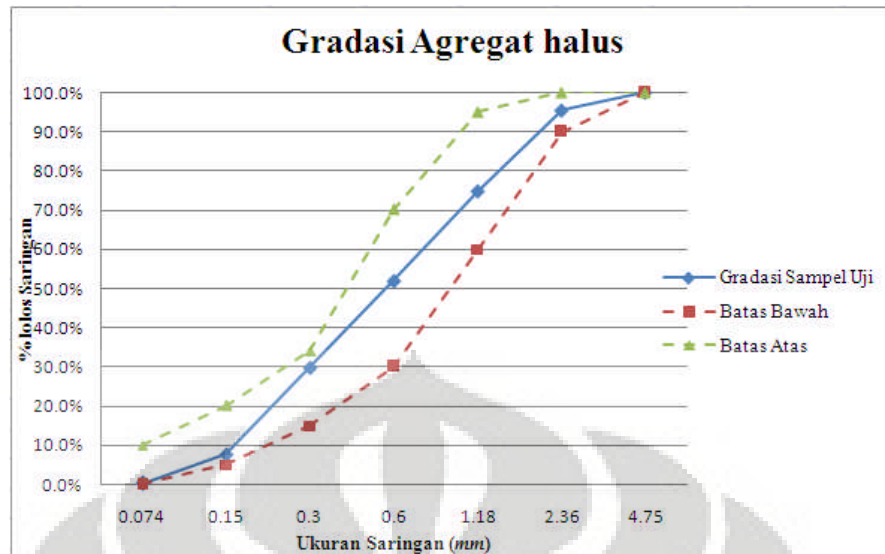
4.2.2 Analisis Saringan dan *Fineness Modul*

Pasir putih Bangka ini memiliki nilai FM sebesar 2,40. FM merupakan modulus kehalusan dari pasir. Persentase pasir yang lolos tiap saringan dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 4. 5 Analisa saringan pasir putih Bangka

No. Sieve	Sieve Ret (mm)	Sample No.1			Sample No.2			AVERAGE	
		Weight Ret (gr)	Ind % Ret	Cum % Ret	Weight Ret (gr)	Ind % Ret	Cum % Ret	Ind % Ret	Cum % Ret
4	4.75	0	0.0%	0.0%	0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
8	2.36	26	5.2%	5.2%	19	3.8%	3.8%	4.5%	4.5%
16	1.18	109	21.8%	27.0%	98	19.6%	23.4%	20.7%	25.2%
30	0.6	113	22.6%	49.6%	115	23.0%	46.4%	22.8%	48.0%
50	0.3	108	21.6%	71.2%	114	22.8%	69.2%	22.2%	70.2%
100	0.15	107	21.4%	92.6%	115	23.0%	92.2%	22.2%	92.4%
200	0.074	36	7.2%	99.8%	38	7.6%	99.8%	7.4%	99.8%
pan	0	1	0.2%	100.0%	1	0.2%	100.0%	0.2%	100.0%
		total	100.0%		total	100.0%		100.0%	
			FM	2.46		FM	2.35	FM Av	2.40

Berdasarkan SK. SNI T-15-1990-03, Pasir putih Bangka ini termasuk daerah gradasi III yaitu pasir halus. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.3 di bawah ini

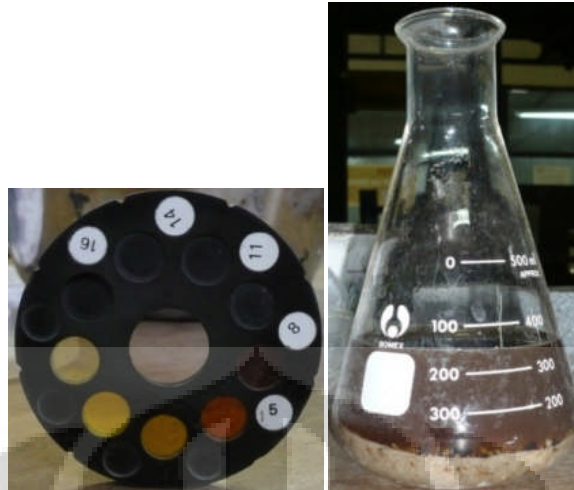


Gambar 4. 3 Gradasi pasir putih Bangka

4.2.3 Kandungan Organik dan Kadar Lumpur

Dari penelitian di laboratorium, pasir putih Bangka ini cukup tinggi kandungan organiknya. Dari pengujian sampel pasir yang telah dilakukan pencucian terlebih dahulu, didapatkan warna benda uji yang gelap cukup pekat. Berdasarkan standar warna, nomor warna yang mendekati adalah warna nomor empat. Hal tersebut menunjukkan kandungan organik pada pasir tidak masuk syarat batas yaitu nomor empat. Kandungan organik berpengaruh dalam ikatan antara semen dengan agregat, semakin besar kandungan organik dari pasir maka akan semakin merusak atau memperlemah ikatan tersebut sehingga kekuatan beton tidak akan maksimal. Khususnya untuk kekuatan jangka panjang.

Kadar lumpur pada sampel pasir putih Bangka ini adalah 2.56%. berdasarkan ketentuan, kandungan lumpur pada pasir yang digunakan masih dalam taraf standar yaitu $< 3\%$, jadi pasir yang digunakan tidak perlu melalui proses pencucian.



Gambar 4. 4 Uji kadar organik pasir putih Bangka

4.3 Pengujian Agregat Kasar

4.3.1 Berat Jenis dan Penyerapan

Berdasarkan pengujian di laboratorium sesuai ASTM C-128-04 , didapatkan berat jenis curah (Bulk Specific Gravity) sebesar 2,51; berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) sebesar 2,59; berat jenis semu (Apparent Specific Gravity) sebesar 2,72; dan penyerapan (adsorpsi) sebesar 3.08%. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.6

Tabel 4. 6 Nilai *specific gravity* agregat kasar

Berat Jenis	Sampel 1	Sampel 2	Average
Berat jenis curah [<i>Bulk Specific Gravity</i>]	2.51	2.51	2.51
Berat jenis jenuh kering permukaan [SSD]	2.59	2.59	2.59
Berat jenis semu [<i>Apparent Specific Gravity</i>]	2.73	2.73	2.73
Penyerapan [Absorpsi]	3.26%	3.20%	3.23%

4.4 Perhitungan Campuran

Berdasarkan penelitian oleh M E Suryatriastuti, komposisi campuran pasta yang paling optimum digunakan pada penelitian ini. Dengan membandingkan rasio molar dari senyawa – senyawa pada *fly ash*, metakaolin dan waterglass yang digunakan dengan rasio molar pada penelitian sebelumnya, maka didapatkan komposisi campuran pasta adalah sebagai berikut;

Tabel 4. 7 komposisi campuran pasta metakaolin dan *fly ash*

Material	Pasta Metakaolin	Pasta Fly Ash
Metakaolin	38.46%	-
<i>Fly Ash</i>	-	54.35%
NaOH	9.62%	3.26%
<i>Waterglass</i>	25.96%	15.22%
<i>Water</i>	25.96%	27.17%

Maka untuk campuran pasta geopolimer dalam sekali pengecoran untuk sampel kubus $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ sebanyak 6 buah terdapat pada tabel berikut;

Tabel 4. 8 Komposisi *fly ash* dan metakaolin

Material	Pasta Metakaolin (gr)	Pasta Fly Ash (gr)
Metakaolin	769.23	-
<i>Fly Ash</i>	-	1,086.96
NaOH	192.31	65.22
<i>Waterglass</i>	519.23	304.35
<i>Water</i>	5,192.31	543.48

Dalam perhitungan rancang campur (mix design) digunakan metode yang merupakan modifikasi dari US Bureau dan JSCE (Japan Society of Civil Engineering). Dengan mengganti pasta semen (air ditambahkan semen) menjadi pasta geopolimer. Hasil perhitungan rancang campur untuk tiap pengecoran (18 dm^3) dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4. 9 Komposisi campuran beton geopolimer untuk 3 buah sampel silinder

No.	Materials	W (Kg)	No.	Materials	W (Kg)
1	<i>Fly Ash</i>	6.2200	1	Metakaolin	4.4019
2	NaOH	0.3732	2	NaOH	1.1005
3	<i>Waterglass</i>	1.7416	3	<i>Waterglass</i>	2.9713
4	<i>Water</i>	1.4294	4	<i>Water</i>	3.7485
5	<i>Fine Aggregate</i>	13.5617	5	<i>Fine Aggregate</i>	13.5617
6	<i>Coarse Aggregate</i>	17.4011	6	<i>Coarse Aggregate</i>	17.4011

(a)

(b)

Untuk mendapatkan hasil yang optimum, rancang campur tersebut di lakukan *trial mix* untuk mendapatkan metode pencampuran dan hasil campuran yang baik. Berdasarkan trial mix beton geopolimer yang dilakukan komposisi pasta geopolimer untuk *fly ash* di kurangi menjadi 36% dari total air yang digunakan karena campuran pasta ataupun beton menjadi sangat encer sehingga dapat mengurangi kekuatan dan proses pengerasan dari beton geopolimer.

4.5 Pengujian Geopolimer

4.5.1 Pasta Geopolimer

Hasil uji tekan dari laboratorium untuk pasta geopolimer dilakukan pada saat pasta geopolimer berumur 4 jam, 8 jam, 24 jam pada suhu curing 60°C dan suhu ruang untuk tiap prekursor. Curing yang dimaksud pada penelitian ini adalah proses pengerasan pasta geopolimer. Seperti halnya beton konvensional, curing dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan tekan dari beton. Namun pada beton geopolimer, curing didapat dengan menaikkan suhu lingkungan. Hasil uji tekan dapat dilihat pada tabel-tabel di bawah ini.

Proses curing suhu 60° C dilakukan dengan oven yang terdapat di laboratorium struktur dan material Departemen Teknik Sipil. Kapasitas oven memiliki dimensi panjang dan lebar 40 cm dan tinggi 50 cm. Suhu ruang merupakan suhu yang diterapkan dengan meletakkan sampel pada ruangan laboratorium ini. Suhunya berkisar antara 24° s.d. 26° Celcius dengan kelembapan antara 79 – 81%.

Tabel 4. 10 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer (*fly ash*) pada suhu ruang

Prekursor Fly Ash				
Suhu Suhu Ruang				
Curing 4 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A (mm ²)	F (MPa)
1	234	1100	2500	4.312
2	238	1200	2500	4.704
3	241	1100	2500	4.312
Average				4.44267
Curing 8 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A (mm ²)	F (MPa)
1	242	2300	2500	9.016
2	246	2400	2500	9.408
3	241	2300	2500	9.016
Average				9.14667
Curing 24 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A (mm ²)	F (MPa)
1	244	3100	2500	12.152
2	240	3100	2500	12.152
3	244	3000	2500	11.76
Average				12.0213

Pada tabel 4.11 merupakan pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash* dengan suhu *curing* pada suhu ruang. kuat tekan pasta maksimum mencapai 12,152 MPa pada sampel no 2 *curing* suhu ruang pada waktu 24 jam. Dengan kuat tekan rata-rata pada waktu 24 jam adalah 12,02 MPa. Kuat tekan rata-rata pada 4 jam dan 8 jam adalah 4,44 MPa dan 9,147 MPa. Gambar 4.5 dibawah ini merupakan contoh hasil dari pasta yang telah diuji kuat tekannya.

Gambar 4. 5 Hasil uji kuat tekan pasta *fly ash*

Tabel 4. 11 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer (*fly ash*) pada suhu 60° C

Prekursor Fly Ash				
Suhu 60° Celcius				
Curing 4 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A mm ²	F MPa
1	234	3000	2500	11.76
2	238	3100	2500	12.152
3	241	3000	2500	11.76
Average				11.8907
Curing 8 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A mm ²	F MPa
1	242	3500	2500	13.72
2	246	3950	2500	15.484
3	241	3900	2500	15.288
Average				14.8307
Curing 24 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A mm ²	F MPa
1	244	9550	2500	37.436
2	240	7750	2500	30.38
3	244	10500	2500	41.16
Average				36.3253

Tabel 4.12 merupakan pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash* dengan suhu *curing* 60° C. kuat tekan pasta maksimum didapat pada suhu curing 60° C dengan kuat tekan mencapai 41,16 MPa pada sampel no 3 dalam waktu 24 jam. Pada waktu 4 jam, 8 jam dan 24 jam kuat tekan dari pasta *fly ash* ini berturut-turut 11,89 MPa, 14,83 MPa, dan 36,325 MPa.

Tabel 4. 12 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer (metakaolin) pada suhu ruang

Prekursor Metakaolin				
Suhu Suhu Ruang				
Curing 4 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A (mm ²)	F (MPa)
1	207	2250	2500	8.82
2	207	2200	2500	8.624
3	205	2150	2500	8.428
Average				8.624
Curing 8 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A (mm ²)	F (MPa)
1	207	2200	2500	8.624
2	208	2450	2500	9.604
3	205	2300	2500	9.016
Average				9.08133
Curing 24 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A (mm ²)	F (MPa)
1	205	2500	2500	9.8
2	205	2450	2500	9.604
3	205	2650	2500	10.388
Average				9.93067

Tabel 4.13 merupakan pasta geopolimer berbahan dasar metakaolin dengan suhu *curing* pada suhu ruang. Kuat tekan pasta maksimum pada curing suhu ruang mencapai kuat tekan 10,388 MPa pada sampel no 3 dengan waktu 24 jam. Dengan kuat tekan rata-rata pada waktu 24 jam adalah 9,93 MPa. Hasil uji kuat tekan pasta metakaolin dapat dilihat pada gambar 4.6 dibawah ini



Gambar 4. 6 Hasil uji kuat tekan pasta metakaolin

Tabel 4. 13 Hasil uji kuat tekan pasta geopolimer (metakaolin) pada suhu 60° C

Prekursor Metakaolin				
Suhu 60° Celcius				
Curing 4 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A (mm ²)	F (MPa)
1	209	7300	2500	28.616
2	207	6900	2500	27.048
3	211	6800	2500	26.656
Average				27.44
Curing 8 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A (mm ²)	F (MPa)
1	213	6350	2500	24.892
2	213	7300	2500	28.616
3	211	7200	2500	28.224
Average				27.244
Curing 24 jam				
No Sampel	Massa (kg)	P (kg)	A (mm ²)	F (MPa)
1	209	6500	2500	25.48
2	212	5750	2500	22.54
3	212	8550	2500	33.516
Average				27.1787

Tabel 4.14 menunjukkan kuat tekan pasta geopolimer berbahan dasar metakaolin dengan suhu *curing* 60° C. kuat tekan pasta maksimum pada suhu ini kuat tekan mencapai 33.516 MPa pada sampel no 3 *curing* 24 jam. Dengan kuat tekan rata-rata pada waktu 24 jam adalah 27.1787 MPa. Dalam nilai kuat tekan rata-rata, metakaolin mencapai suhu maksimum di awal uji tekan yaitu waktu 4 jam, dengan kuat tekan rata-rata sebesar 27,44 MPa.

4.5.2 Beton Geopolimer

Hasil uji tekan dari laboratorium untuk beton geopolimer sample silinder dilakukan pada saat beton geopolimer berumur 4 jam, 8 jam, 24 jam pada suhu 60°C dan suhu ruang. Dan merupakan penerepan dari pasta geopolimer untuk tiap prekursor. Hasil uji tekan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

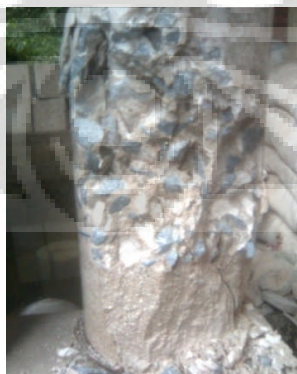
Tabel 4. 14 Hasil uji kuat tekan beton geopolimer metakaolin

Sampel	Parameter	Waktu Curing (jam)	w (Kg)	P (Kg)	fc' (Mpa)	Pola Retak
Metakaolin	Suhu Ruang	4	12.004	25000	13.86	C
		8	12.221	25000	13.86	B
		24	11.974	26500	14.70	C
	60° C	4	12.154	27500	15.25	B
		8	12.2	29000	16.08	C
		24	11.856	31000	17.19	C

Tabel 4.15 Menunjukkan nilai kuat tekan pada beton geopolimer berprekursor metakaolin. Kuat tekan pada suhu ruang maksimum pada waktu 24 jam dengan kuat tekan rata-rata 14,70 MPa. Pada suhu curing 60° C, kuat tekan maksimum didapat pada waktu curing 24 jam dengan tekan 17,19 MPa. Pada gambar 4.5 dan 4.6 dapat dilihat hasil uji tekan pada beton geopolimer metakaolin. Kedua sampel tersebut menghasilkan pola retak B untuk gambar 4.6 dan C untuk gambar 4.5.



Gambar 4. 7 Hasil uji tekan beton geopolimer metakaolin



Gambar 4. 8 Pola retak beton geopolimer tipe B

Tabel 4. 15 Hasil uji kuat tekan beton geopolimer *fly ash*

Sampel	Parameter	Waktu Curing (jam)	w (Kg)	P (Kg)	fc' (Mpa)	Pola Retak
Fly Ash	Suhu Ruang	4	-	-	0	-
		8	-	-	0	-
		24	12.5045	987.5	0.54763	C
	60° C	4	12.77	1100	0.61002	C
		8	12.664	4150	2.30145	C
		24	12.6	19000	10.5368	C

Tabel 4.16 Menunjukkan nilai kuat tekan pada beton geopolimer berprekursor *fly ash*. Kuat tekan pada suhu ruang maksimum pada waktu 24 jam dengan kuat tekan rata-rata 0,547 MPa. Pada waktu 4 jam dan 8 jam sampel tidak dapat diuji karena permukaan beton masih dalam keadaan cair. Untuk *curing* pada suhu 60° C, kuat tekan maksimum didapat pada waktu curing 24 jam dengan tekan 10,537 MPa.

Gambar 4. 9 Hasil uji kuat tekan beton geopolimer *fly ash*

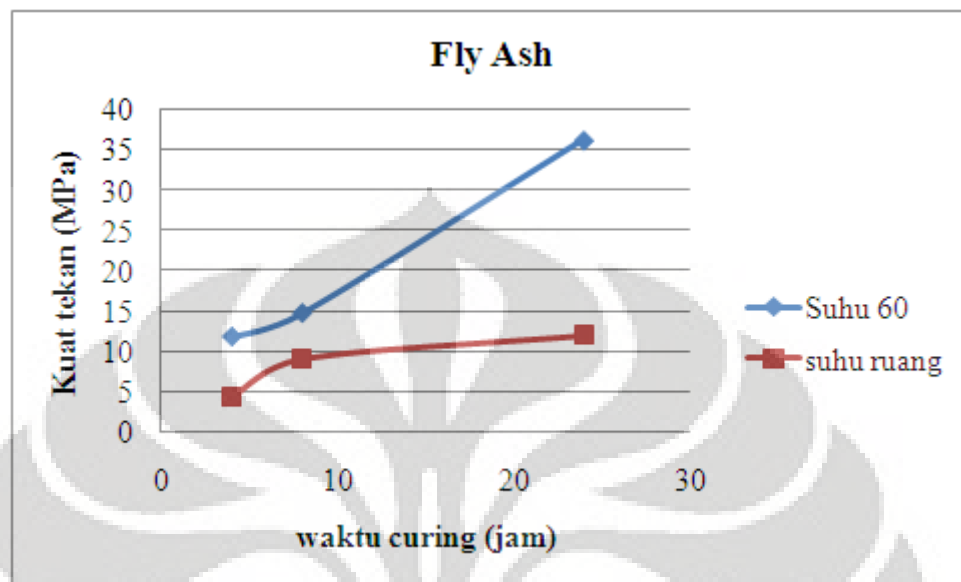
4.6 Analisa

4.6.1 Hubungan Kuat Tekan Pasta dengan Suhu Curing dan Waktu

Berdasarkan hipotesa awal penelitian, 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. *Curing* pada suhu 60° C, kuat tekan pasta geopolimer lebih tinggi

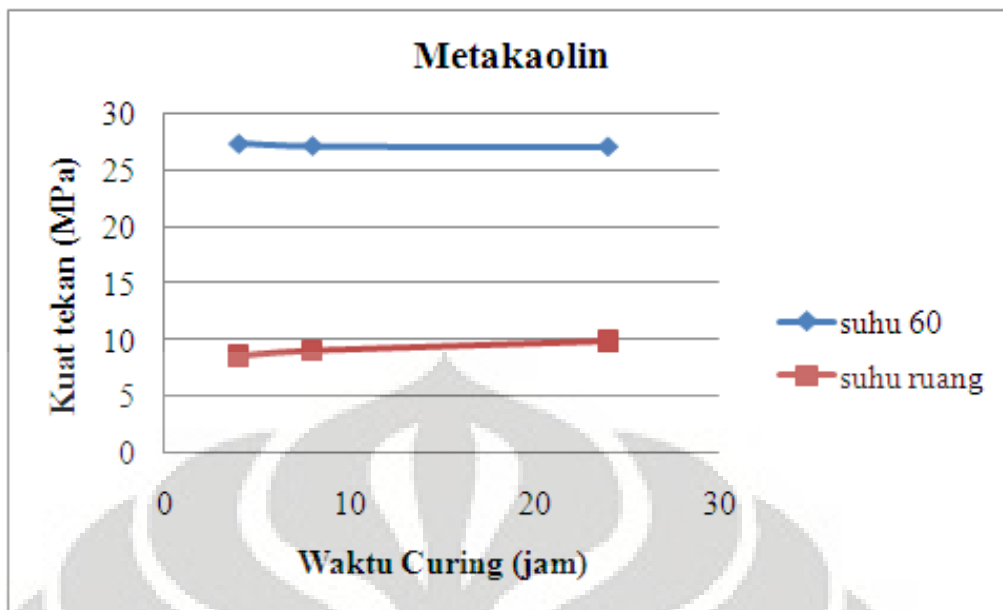
dibandingkan suhu ruang. Berdasarkan data-data uji kuat tekan pasta dapat dilihat pada grafik gambar 4.8;



Gambar 4. 10 Grafik perbandingan uji tekan pasta (*fly ash*)

Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa suhu pengerasan dapat mempengaruhi kuat tekan dari pasta geopolimer. Pada suhu 60°C , geopolimer berbahan dasar *fly ash* memiliki nilai kuat tekan mencapai 36,23 MPa pada waktu 24 jam. Apabila dibandingkan dengan suhu ruang, kuat tekan hanya mencapai 12,02 MPa dengan waktu curing yang sama. Hal ini menunjukkan kuat tekan pasta meningkat geopolimer sampai 3 kali lipat dalam waktu 24 jam dengan suhu curing yang ditingkatkan.

Faktor waktu ternyata juga mempengaruhi kuat tekan pasta geopolimer. Semakin lama waktu dari peng-*curing*-an maka akan semakin meningkat kuat tekan pasta tersebut dalam suhu curing yang sama. Pada waktu 4 jam dengan suhu 60°C , kuat tekan pasta berprekursor *fly ash* senilai 11,89 MPa. Ketika waktu curing ditambah hingga waktu 24 jam, kuat tekan dari pasta ini meningkat sebesar 36,23 MPa. Berdasarkan penelitian ini dapat dibuktikan bahwa lamanya waktu peng-*curing*-an dengan suhu curing yang tetap kuat tekan pasta geopolimer dapat meningkat.



Gambar 4. 11 Grafik perbandingan uji tekan pasta (metakaolin)

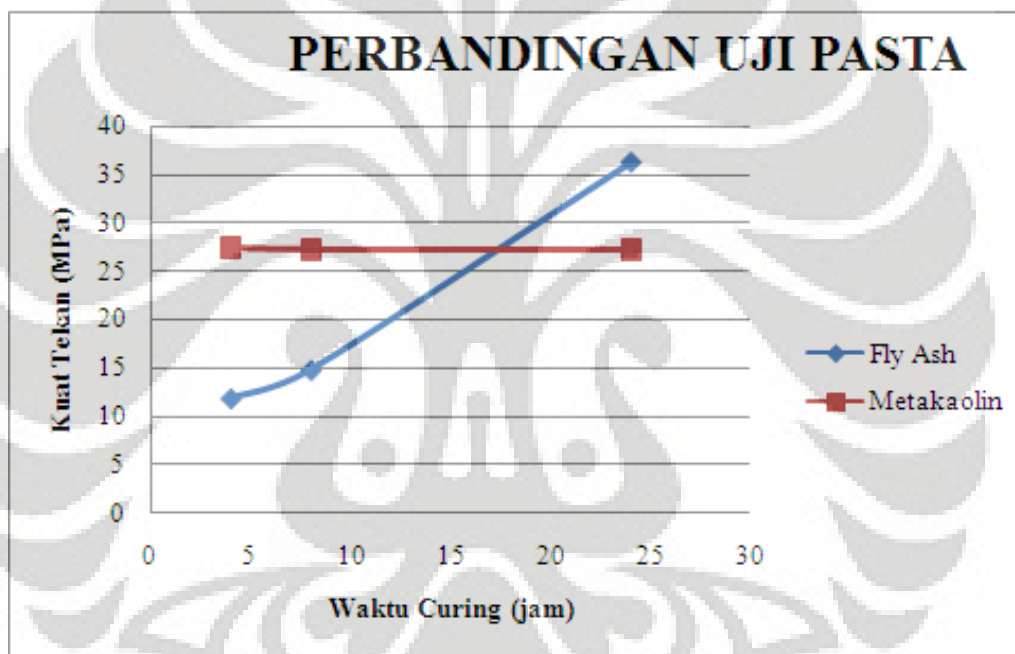
Pada prekursor dengan metakaolin faktor suhu juga mempengaruhi terhadap kenaikan kuat tekan pasta geopolimer. grafik 4.11 menunjukkan perbedaan nilai kuat tekan yang cukup berbeda pada curing suhu 60°C dan suhu ruang. suhu 60°C , kuat tekan maksimum mencapai 27,44 MPa sedangkan suhu ruang hanya mencapai 9,93 MPa. Berdasarkan literatur, dapat disimpulkan pengaruh meningkatkan suhu *curing* mempercepat reaksi polimerisasi dari larutan alkali dan prekursor sehingga kuat tekan pasta akan lebih besar pada suhu yang lebih tinggi.

Faktor menaikkan waktu curing pada pasta metakaolin dengan suhu yang sama, tidak menaikkan kuat tekan pasta tersebut. Dari grafik 4.11 dapat dilihat bahwa pada suhu ruang ataupun suhu 60°C , kuat tekan dari pasta ini cenderung stabil dan bahkan tidak mengalami kenaikan yang signifikan. Pada waktu 4 jam kuat tekan sudah mencapai 27,44 MPa, namun pada waktu 8 jam dan 24 jam berturut-turut kuat tekan dari pasta tetap berkisar pada nilai 27 MPa, tepatnya 27,24 MPa dan 27,18 MPa.

Analisa hasil tersebut dapat dihubungkan dengan penambahan suhu *curing* yang mengakibatkan proses polimerisasi pada pasta geopolimer metakaolin menjadi lebih cepat. Proses polimerisasi pada campuran tersebut sayangnya sudah selesai dalam waktu singkat. Disolusi-disolusi ion-ion silikat pada aktivator dan prekursor sudah selesai bereaksi sehingga proses polikondensasi dari beton geopolimer telah berhenti, sehingga menyebabkan kenaikan kuat tekan tidak

terlalu signifikan bahkan tetap. Untuk membuktikan dari analisa ini dapat dibuktikan dengan uji thermal analysis dari kedua pasta tersebut yang dapat dilihat pada grafik 4.13.

Perbandingan kuat tekan pasta geopolimer dengan *curing* pada suhu 60°C terdapat pada gambar grafik 4.12 dibawah. Pada grafik tersebut menunjukkan kuat tekan pasta geopolimer *fly ash* terus meningkat sampai waktu 24 jam, sedangkan pada pasta geopolimer metakaolin kuat tekannya langsung tinggi di awal, namun stabil setelah waktu 4 jam. Hal ini menunjukkan reaksi polimerisasi dari pasta metakaolin lebih cepat dibandingkan dengan pasta *fly ash*, tapi reaksi dari pasta metakaolin selesai dalam waktu singkat.



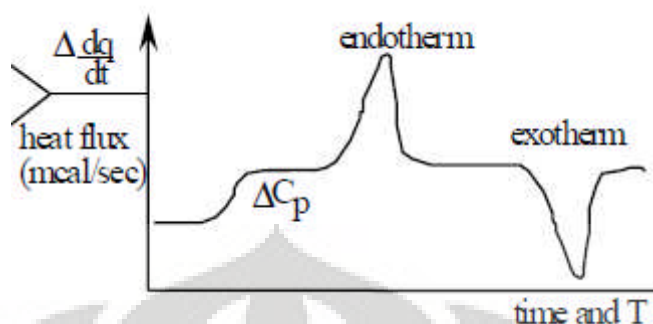
Gambar 4. 12 Grafik perbandingan uji tekan pasta

4.6.2 Analisa Thermal

4.6.2.1 Pendahuluan

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) yang terdapat pada gambar 4.13. Suatu analisa termal memiliki keuntungan jumlah material yang dibutuhkan hanya sedikit sebesar kurang lebih

tujuh gram. Pada penelitian ini, analisa yang digunakan dengan metode DSC (Differential Scanning Calorimetry).



Gambar 4. 13 grafik analisa termal
(<http://www.colby.edu/chemistry/PChem/lab/DiffScanningCal.pdf>)

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.



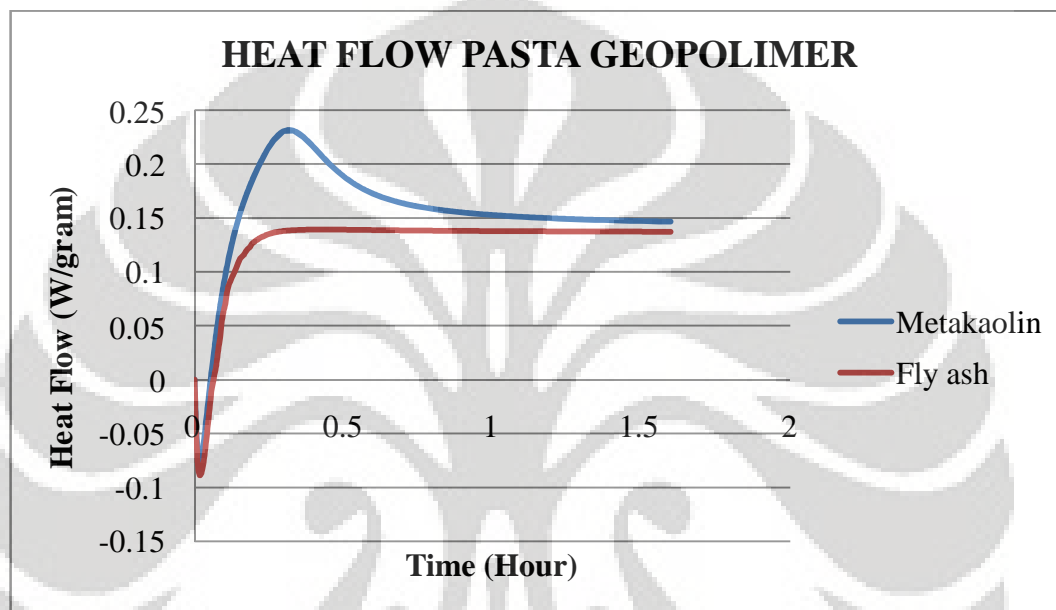
Gambar 4. 14 Alat analisa termal DSC

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.

4.6.2.2 Hasil uji dan analisa termal

Pada penelitian ini, analisa termal dilakukan untuk mengetahui reaksi yang terjadi pada pasta geopolimer baik pada *fly ash* maupun metakaolin. Penelitian dilakukan di Laboratorium PT Indocement Tunggal Prakarsa, Citereup.

Analisa termal dilakukan pada campuran pasta geopolimer dengan waktu uji selama 24 jam pada suhu uji 50° C. Pada gambar 4.14 merupakan hasil analisa termal yang menampilkan hubungan antara *heat flow* dengan waktu.

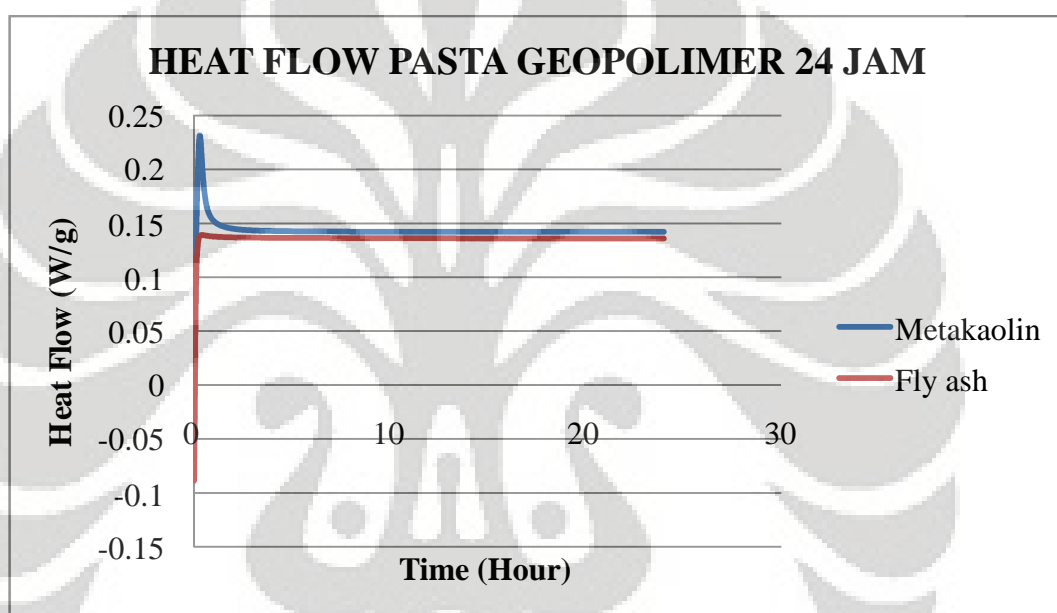


Gambar 4. 15 *Heat flow* pasta geopolimer

Pada grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa kedua pasta geopolimer membutuhkan panas untuk bereaksi. Hal ini ditunjukkan dengan kenaikan *heat flow* pada waktu kurang dari setengah jam. Sesuai referensi diatas, kenaikan *heat flow* merupakan reaksi endoterm (menyerap panas).

Perbedaan grafik dari pasta geopolimer dari metakaolin dan *fly ash* menunjukkan reaksi polimerisasi yang terjadi. Pada pasta metakaolin, reaksi polimerisasi cepat bereaksi pada waktu kurang dari setengah jam yang dapat dilihat tingginya nilai *heat flow* hanya dalam waktu 18 menit sebesar 0,23. Namun, reaksi polimerisasi telah selesai dalam waktu setelah 18 menit, dikarenakan grafik *heat flow* menunjukkan penurunan, yang artinya reaksi penyerapan panas (endotermal) pada pasta metakaolin telah selesai terjadi. Hal ini yang mengakibatkan nilai kuat tekan pasta pada metakaolin dapat tinggi di awal namun tidak mengalami peningkatan apabila waktu curing ditambah.

Pasta *fly ash* pada uji termal memiliki perbedaan sifat dengan pasta metakaolin. Pada pasta *fly ash*, reaksi endoterm terus berlangsung sampai proses uji termal selesai. Hal ini ditunjukkan dengan tidak menurunnya grafik *heat flow* terhadap waktu. Hal ini juga yang dapat disimpulkan pada uji kuat tekan pasta *fly ash* dapat terus meningkat seiring bertambahnya waktu *curing*, reaksi polimerisasi dari *fly ash* cenderung lebih lambat dibanding dengan metakaolin. Tetapi reaksi polimerisasi pada *fly ash* masih terus berlangsung sampai waktu 24 jam, bahkan masih dapat bereaksi melebihi waktu 24 jam karena proses endoterm pada pasta tersebut terus berlangsung. Seperti yang terdapat pada gambar 4. 16.



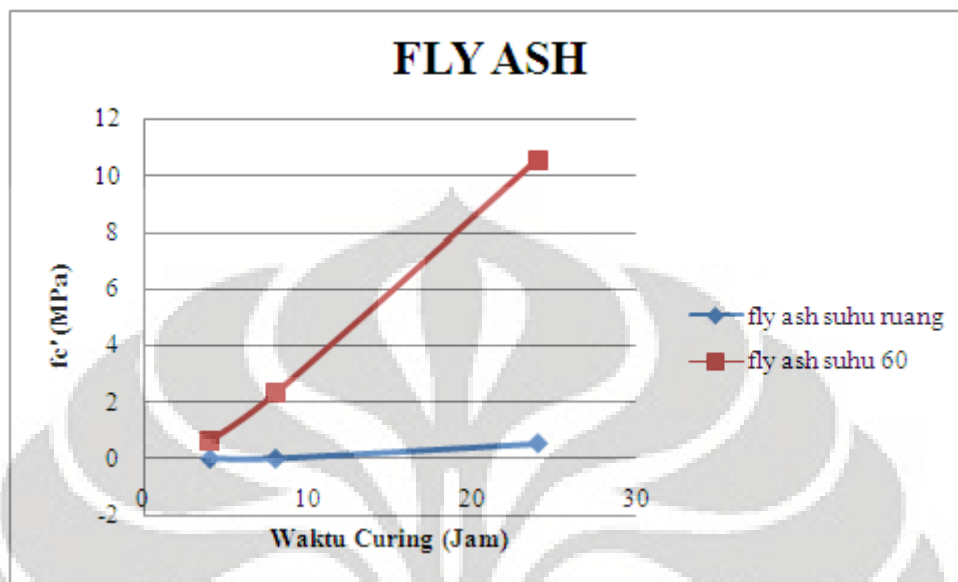
Gambar 4. 16 Heat flow pasta geopolimer selama 24 jam

4.6.3 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Kuat Pasta Geopolimer

Dalam aplikasinya terhadap percobaan kuat tekan beton. Beton geopolimer harus di uji kuat tekan untuk mengetahui nilai kuat tekan beton geopolimer. Karena nilai kuat tekan pasta belum tentu menggambarkan nilai kuat tekan pada beton geopolimer. Pada beton terdapat hubungan matriks-matrisk lain seperti agregat kasar dan halus.

Sampel beton yang digunakan yaitu sampel silinder dengan menggunakan parameter yang sama seperti uji pasta geopolimer, yaitu peng-*curing*-an beton geopolimer pada suhu 60° C dan suhu ruang dengan waktu curing 4 jam, 8 jam, dan satu hari (24 jam).

Pada gambar grafik 4.17 menunjukkan nilai kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dengan perbandingan suhu ruang dan suhu oven 60° Celcius.

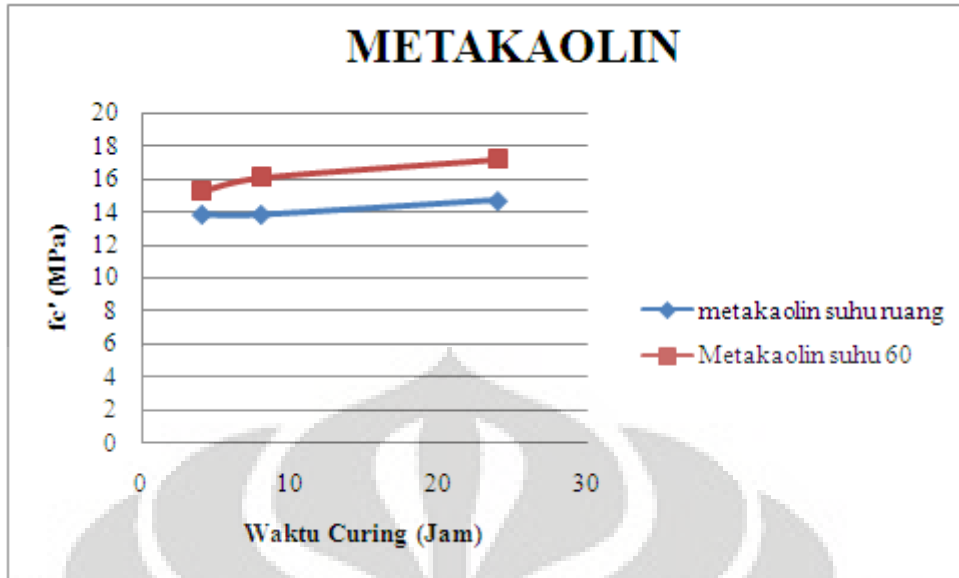


Gambar 4. 17 Perbandingan kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar *fly ash*

Grafik diatas menunjukkan bahwa kuat tekan dari beton geopolimer *fly ash* meningkat seiring waktu curing baik pada suhu 60° C ataupun suhu ruang. Namun, dikarenakan proses polimerisasi dari *fly ash* lambat dan volume dari beton geopolimer yang lebih besar dari pasta sehingga beton geopolimer membutuhkan waktu yang lebih lama untuk curingnya. Maka kuat tekan pada waktu 4 jam adalah nol atau dengan kata lain beton belum mengeras.

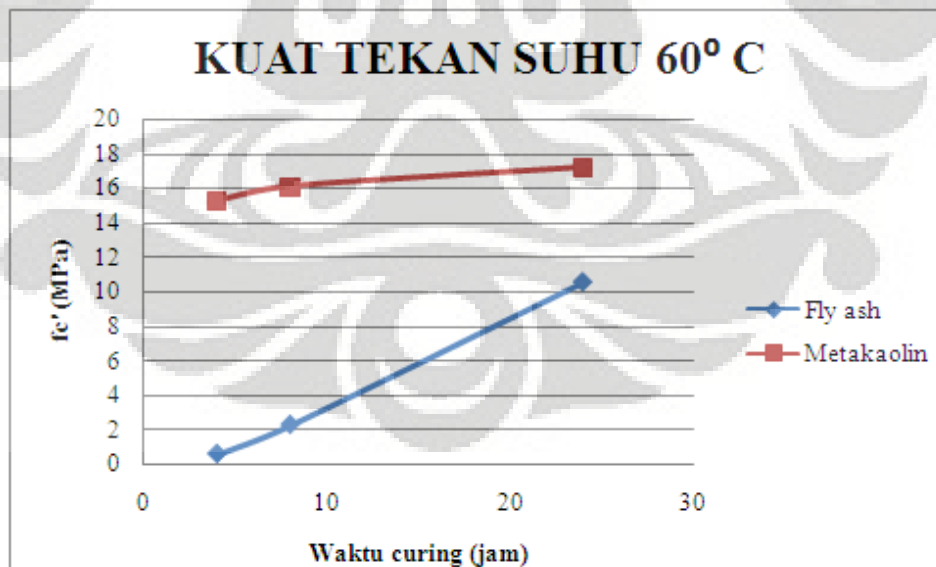
Analisa tersebut dapat dibuktikan dengan menaikinya kuat tekan seiring bertambahnya waktu curing pada suhu curing 60° C. kuat tekan beton geopolimer mencapai 10,54 MPa pada waktu 24 jam. Nilai kuat tekan ini jauh lebih kecil dibandingkan dengan kuat tekan pasta *fly ash*. Dua faktor di atas adalah yang mempengaruhinya. Dapat diprediksi bahwa kuat tekan ini dapat meningkat terus apabila waktu curing ditambah melebihi 24 jam.

Pada kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar metakaolin, dapat dilihat pada gambar grafik 4.18. Grafik ini menunjukkan hubungan antara waktu curing dengan kuat tekan dari beton geopolimer, dengan parameter suhu ruang dan suhu 60° C;



Gambar 4. 18 Perbandingan kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar metakaolin

Pada grafik diatas menunjukkan kuat tekan beton geopolimer metakaolin memiliki perilaku yang serupa dengan pasta metakaolin. Kuat tekan beton geopolimer metakaolin dengan suhu curing 60° C lebih tinggi dibandingkan dengan suhu ruang. Kuat tekan beton geopolimer dengan curing suhu 60° C pada waktu 24 jam adalah 17,19 MPa sedangkan suhu ruang 14,70 MPa.



Gambar 4. 19 Perbandingan kuat tekan beton geopolimer pada suhu 60° Celcius

Pada grafik 4.19 dibandingkan kuat tekan beton pada suhu curing 60°C , kuat tekan beton dengan prekursor *fly ash* lebih kecil dibandingkan dengan kuat tekan beton geopolimer prekursor metakaolin. Pada curing suhu 60°C dalam waktu 4 jam kondisi dari beton geopolimer *fly ash* masih dalam keadaan cair, sehingga sampel tersebut belum dapat diuji tekan atau memiliki nilai kuat tekan nol. Sebaliknya pada beton geopolimer metakaolin, nilai kuat tekan sudah relatif tinggi yaitu 15,25 MPa. Hal ini menunjukkan meningkatkan suhu curing dapat mempercepat reaksi polimerisasi geopolimer, namun akibat lambatnya reaksi polimerisasi pada pasta *fly ash* ditambah dengan volume beton lebih besar dari pasta, maka nilai kuat tekan metakaolin akan lebih besar pada waktu curing yang lebih cepat.

Pada waktu curing 24 jam kuat tekan dari beton geopolimer *fly ash* meningkat sebesar 10,54 MPa sedangkan beton metakaolin naik sedikit menjadi 17,19 MPa. Kenaikan kuat tekan *fly ash* menandakan reaksi polimerisasi dari pasta nya telah berlangsung, namun reaksi tersebut belum selesai karena masih menunjukkan kenaikan. Perlu ditambahkan waktu curing dengan suhu curing yang tetap merupakan solusi untuk meningkatkan kuat tekan dari beton geopolimer *fly ash* ini, karena volume beton lebih tinggi dibandingkan volume pasta.

Pada beton metakaolin seperti dijelaskan pada subbab sebelumnya. Kekuatan maksimum sudah dapat tercapai pada waktu curing awal karena proses polimerisasinya yang sangat cepat dan cepat pula selesai. Hal ini lah yang menyebabkan kuat tekan beton geopolimer metkaolin tidak naik dengan ditambahkan waktu *curing*.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 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. Pada suhu yang sama kuat tekan dari pasta geopolimer meningkat seiring dengan bertambahnya waktu *curing* khususnya untuk pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash*;
 - Pada curing suhu 60° C dalam waktu 4 jam, 8 jam dan 24 jam kuat tekan dari pasta *fly ash* ini berturut-turut 11,89 MPa, 14,83 MPa, dan 36,325 MPa.
 - Pada curing suhu ruang dalam waktu 4 jam, 8 jam dan 24 jam kuat tekan dari pasta *fly ash* ini berturut-turut 4,44 MPa, 9,147 MPa, dan 12,02 MPa
2. Untuk waktu *curing* yang sama, suhu lebih tinggi menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi.
 - Pada *fly ash*, Dalam waktu 24 jam, suhu 60° C memiliki kuat tekan pasta 36,325 MPa sedangkan kuat tekan pada suhu ruang hanya 12,02 MPa
 - Pada Metakaolin, Dalam waktu 24 jam, suhu 60° C memiliki kuat tekan pasta 27.1787 MPa sedangkan kuat tekan pada suhu ruang hanya 9,93 MPa
3. Berdasarkan hasil *thermal analysis*, waktu curing pada pasta atau pun beton berbahan dasar metakaolin tidak mempengaruhi kenaikan kuat tekan pastinya. Dikarenakan reaksi polimerisasi dari pasta metakaolin sangat cepat, dan reaksi tersebut selesai dalam waktu yang singkat
4. Pada beton geopolimer *fly ash* nilai kuat tekannya lebih kecil dibandingkan pastinya, berdasarkan analisa termal, waktu curing 24 jam dari beton ini tidak cukup untuk menyelesaikan proses polimerisasi. Sehingga kuat tekan beton belum mencapai maksimum.

5.2 Saran

Sedangkan saran untuk penelitian selanjutnya dari apa yang telah didapatkan pada penelitian ini di antaranya:

1. Pengecoran untuk beton geopolimer haruslah melalui tahap trial mix agar peneliti dapat paham dan mengetahui langkah-langkah yang tepat dalam proses pembuatan sampel
2. Dalam proses pembentukan metakaolin dari kaolin, suhu pemanasan berkisar 700-750° Celcius dengan waktu pengovenan kurang lebih 4 – 5 jam agar kondisi amorphous dari metakaolin merata
3. Jumlah SDM dalam pengecoran dari beton geopolimer harus banyak dikarenakan proses *setting time* dari beton geopolimer relatif singkat.
4. Geopolimer ini memiliki potensi untuk dapat diaplikasikan sebagai semen instan, karena itu perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut untuk waktu peng-*curing*-an yang lebih lama dengan suhu yang divariasikan atau ditingkatkan.

DAFTAR REFERENSI

Buku Pedoman Praktikum. “Pemeriksaan Bahan Beton dan Mutu Beton.”
Laboratorium Struktur dan Material Departemen Teknik Sipil FTUI.
Depok: 2009)

Davidovits, J. *Properties of Geopolymer Cements*. Geopolymer Institute. 1994

Davidovits, Joseph, *Geopolimer: Chemistry and Application*, Institut Geopolimer,
2008

Davidovits, J. dan J.L. Sawyer. 1985. “Early High Strength Mineral Polymers”.
US Patent no 4509985

Duma, Heidi. 2008. “Studi Perilaku Kuat Lentur dan Susut Beton Agregat Daur
Ulang.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
Universitas Indonesia : Depok

Hadi, Abdul. 2006. “Perilaku Beton Geopolimer Berbahan Dasar Limbah Batu
Bara.” Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Indonesia,
Depok.

http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_scanning_calorimetry

http://labujipolimer.com/index.php?option=com_content&task=view&id=34&Itemid=51

Jaarsveld, J.G.S van. J.S.J van Deventer, dan A. Scharzman. 1999. *The Potential
Use of Geopolymer Materials to Immobilise Toxic Metals : Part II,
Material and Leaching Characteristic*. Mineral Engineering,12 (1), pp. 75-
91.

Neville, Adam M. *Properties of Concrete 3rd edition*. Longman and Technical.
1988

Nugraha, P. "Teknologi Beton dengan Antisipasi Terhadap Pedoman Beton." 1989. Surabaya Penerbitan U K Petra.1980 hal 31.

Palomo A, Grutzeck MW, Blanco MT. *Alkali-Activated Fly ashes: A cement for the future*. Cem. Conc. Res. 1999;29(8):1323-9

Rosdianti, isma. Abu Terbang (*FLY ASH*) solusi Pencemaran Semen
<http://wartawarga.gunadarma.ac.id/2009/10/abu-terbang-fly-ash-solusi-pencemaran-semen/>

Suryatiryastuti, M. E. 2008. "Perilaku Balok Beton Bertulang Geopolimer Akibat Pembebanan Statis Dengan Bantuan Software Labview." Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik Universitas Indonesia : Depok.

Swanepoel JC, Strydom CA. *Utilisation of Fly ash in Geopolymeric Material*. Appl. Geochem. 2002;17(8):1143-8.

Troxell, G. E. H E Davis, *Composition and Properties of Concrete*. New York. 1956.

Xu Hua and J.S.J. Van Deventer, *Geopolymerisation of Multiple Minerals*, Mineral Engineering, 2002.

Yoky Edy Saputra, Analisa Termal Differential Scanning Calorimetry (DSC)
http://www.chem-is-try.org/artikel_kimia/kimia_analisis/analisa-termal-differential-scanning-calorimetry-dsc/

LAMPIRAN

Lampiran A-1 Perhitungan Mix Design Beton dengan Metode US Bureau dan
JSCE (*Japan Society of Civil Engineering*)

FAS	0.44	
Slump	8	cm
Specific Gravity of Portland Cement	3.1	1000 kg/m ³
Specific Gravity of Coarse Aggregate	2.59	1000 kg/m ³
Fineness Modulus of Fine Agregate	2.4	
Specific Gravity of Fine Agregate	2.59	1000 kg/m ³
Maximum Size of Aggregate	25	mm
For:		
Fineness Modulus of Fine Agregate	2.8	
Slump	8	cm
from Table 1. (Concrete without AE),		
Entrapped air	1.5	%
Sand percent, S/a	41	%
Water content	175	kg

So, from Table 2:

No.	Changes in materials of proportions	Sand percent, S/a (%)	Water content, W (kg)
1	FM of sand	-2	0
2	Slump	0	0
3	Using crushed coarse aggregate	4	12
4	Water-cemen ratio (FAS)	0.8	0
5	S/a	0	4.2
	Total	43.8	191.2

Total materials per cubic metre of concrete are:

No.	Materials	Weight (kg)	Volume (%)
1	Cement	434.5454545	0.140175953
2	Water	191.2	0.1912
3	Fine Aggregate	741.4841913	0.286287333
4	Coarse Aggregate	951.4020902	0.367336714
5	Entrapped air	-	0.015
	Total		1

Lampiran A – 2 Komposisi pasta geopolimer

Tabel Komposisi persentase campuran pasta metakaolin

	%
Metakaolin	38.4615385
NaOH	9.61538462
NaSil	25.9615385
Water	25.9615385

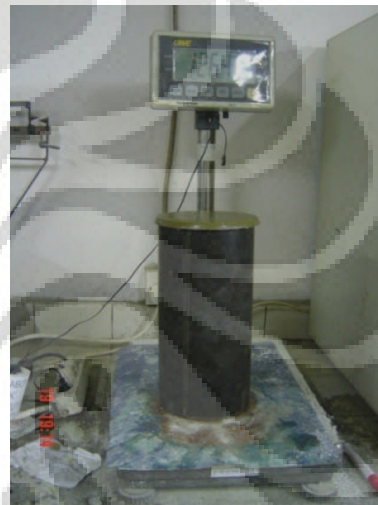
Tabel Komposisi persentase campuran pasta *fly ash*

	%
Fly Ash	54.34782609
NaOH	3.260869565
NaSil	15.2173913
Water	9.9

Lampiran A-3 Data uji tekan beton silinder geopolimer

Sampel	Parameter	Waktu Curing (jam)	w (Kg)	P (Kg)	fc' (Mpa)	Pola Retak
Fly Ash	Suhu Ruang	4	-	-	0	-
		8	-	-	0	-
		24	12.5045	990	0.55	C
			12.45	985	0.55	C
			12.5	987.5	0.55	C
		60° C	4	12.77	1100	0.61002
	12.8			1100	0.61	C
	12.56			1150	0.64	C
	8		12.455	4150	2.30	C
			12.553	4200	2.33	C
			12.664	4100	2.27	C
	24		12.6	19000	10.54	C
			12.554	19000	10.54	C
			12.46	19000	10.54	C
	Sampel	Parameter	Waktu Curing (jam)	w (Kg)	P (Kg)	fc' (Mpa)
Metakaolin	Suhu Ruang	4	12.004	25000	13.86	C
			12.12	26000	14.42	C
			12.056	24000	13.31	C
		8	12.221	25000	13.86	B
			12.15	26000	14.42	C
			12.2	25000	13.86	C
		24	11.974	26500	14.70	C
			12.164	26500	14.70	C
			12.056	26500	14.70	C
	60° C	4	12.154	27500	15.25	C
			12.23	28000	15.53	C
			12.155	27000	14.97	B
		8	12.2	29000	16.08	C
			12.14	29000	16.08	C
			12.25	29000	16.08	C
24	11.856	31000	17.19	C		
	12.14	31000	17.19	C		
	11.85	30500	16.91	C		

Lampiran B – 1 Foto-foto pengujian sampel pasta dan beton geopolimer



Lampiran B – 1 Foto-foto pengujian sampel pasta dan beton geopolimer (lanjutan)



Lampiran B – 2 Gambar proses pengecoran beton geopolimer



Lampiran C – 1 Data thermal Analysis

Data Pasta Metakaolin

No	Time (Hour)	W/g
1	0	0
2	0.004289	-0.03928
3	0.010721	-0.06809
4	0.017153	-0.07648
5	0.024389	-0.06913
6	0.031625	-0.05504
7	0.038058	-0.03954
8	0.045027	-0.02189
9	0.051995	-0.0044
10	0.057891	0.009895
11	0.0662	0.028857
12	0.0729	0.043258
13	0.079332	0.056108
14	0.085764	0.068227
15	0.090053	0.075838
16	0.096485	0.086582
17	0.102917	0.096687
18	0.107741	0.103773
19	0.112566	0.110535
20	0.119801	0.119938
21	0.127038	0.128705
22	0.132934	0.135336
23	0.13883	0.141529
24	0.145262	0.147865
25	0.15223	0.154256
26	0.160271	0.16113
27	0.166703	0.166269
28	0.171527	0.16995
29	0.17796	0.174628
30	0.184928	0.179479
31	0.189752	0.182713
32	0.195113	0.18618
33	0.201545	0.190223
34	0.208782	0.19459
35	0.216018	0.198806
36	0.220843	0.201524
37	0.227275	0.205017
38	0.234243	0.208651
39	0.239067	0.211063
40	0.244427	0.213612
41	0.250859	0.216525
42	0.256755	0.219002
43	0.26158	0.2209
44	0.268012	0.2232
45	0.274444	0.225272
46	0.280877	0.227043
47	0.287845	0.228665
48	0.292669	0.229591
49	0.297493	0.230326
50	0.303925	0.23106
51	0.310893	0.23151
52	0.318666	0.231619
53	0.325903	0.231384
54	0.332334	0.230871
55	0.339303	0.230072
56	0.344127	0.229371
57	0.349487	0.22844
58	0.355919	0.227185
59	0.361815	0.225888
60	0.368248	0.224352
61	0.373072	0.223129
62	0.379504	0.221411
63	0.385936	0.219627
64	0.392368	0.21778
65	0.400944	0.215259
66	0.407377	0.213343
67	0.413809	0.211418
68	0.420241	0.209497
69	0.427477	0.207355
70	0.43525	0.205085
71	0.441682	0.203239
72	0.448918	0.201213
73	0.456155	0.199234
74	0.463392	0.197318
75	0.470628	0.195455
76	0.475453	0.194253
77	0.481885	0.192693
78	0.489121	0.191002

79	0.496357	0.189368	122	0.76115	0.160138
80	0.501182	0.18832	123	0.767582	0.159831
81	0.50815	0.186856	124	0.772406	0.159607
82	0.514582	0.185553	125	0.778302	0.15934
83	0.519406	0.184611	126	0.785003	0.159046
84	0.525838	0.183396	127	0.792239	0.158737
85	0.531734	0.182323	128	0.797063	0.158537
86	0.537631	0.18129	129	0.803495	0.158276
87	0.544599	0.180117	130	0.810464	0.158002
88	0.549959	0.179245	131	0.817432	0.157735
89	0.555319	0.178406	132	0.823864	0.157496
90	0.561752	0.177432	133	0.828688	0.15732
91	0.567647	0.176575	134	0.834048	0.15713
92	0.574884	0.175566	135	0.84048	0.156906
93	0.58212	0.174596	136	0.847181	0.156679
94	0.585336	0.174181	137	0.855489	0.156405
95	0.591768	0.173376	138	0.861921	0.1562
96	0.598201	0.172599	139	0.868889	0.155982
97	0.605973	0.171705	140	0.873714	0.155835
98	0.613209	0.170905	141	0.88095	0.155619
99	0.619641	0.170227	142	0.888186	0.155409
100	0.625002	0.169679	143	0.894618	0.155227
101	0.629826	0.169203	144	0.90105	0.155049
102	0.636794	0.168538	145	0.907482	0.154875
103	0.643226	0.167947	146	0.912307	0.154747
104	0.648051	0.167519	147	0.917131	0.154621
105	0.654483	0.166967	148	0.923563	0.154457
106	0.660915	0.166434	149	0.929996	0.154296
107	0.665739	0.166047	150	0.937232	0.154119
108	0.671099	0.165631	151	0.94554	0.153921
109	0.677531	0.165144	152	0.951436	0.153784
110	0.683428	0.164715	153	0.957869	0.153637
111	0.68986	0.164262	154	0.965105	0.153476
112	0.696828	0.163789	155	0.972341	0.153317
113	0.703796	0.163332	156	0.977165	0.153214
114	0.70862	0.163026	157	0.981989	0.153112
115	0.713445	0.162728	158	0.988421	0.152979
116	0.720681	0.162295	159	0.996462	0.152816
117	0.727917	0.161876	160	1.004502	0.152657
118	0.735957	0.161431	161	1.009862	0.152554
119	0.743997	0.161001	162	1.016294	0.152431
120	0.75043	0.160668	163	1.02219	0.152321
121	0.754718	0.160453	164	1.028623	0.152203

165	1.035591	0.152078	208	1.329331	0.148417
166	1.042559	0.151955	209	1.335763	0.148362
167	1.0506	0.151816	210	1.342999	0.148301
168	1.057568	0.151698	211	1.350772	0.148236
169	1.063464	0.1516	212	1.357204	0.148183
170	1.069896	0.151496	213	1.365244	0.148118
171	1.076328	0.151392	214	1.373284	0.148054
172	1.083565	0.151279	215	1.378645	0.148012
173	1.091338	0.151159	216	1.385077	0.147962
174	1.09777	0.151062	217	1.392313	0.147907
175	1.105006	0.150954	218	1.400085	0.147848
176	1.112779	0.150841	219	1.406517	0.1478
177	1.119211	0.150749	220	1.413754	0.147747
178	1.126447	0.150648	221	1.421526	0.147691
179	1.133683	0.150548	222	1.425814	0.14766
180	1.141724	0.150439	223	1.43171	0.147619
181	1.1503	0.150326	224	1.438143	0.147574
182	1.15834	0.150222	225	1.445379	0.147524
183	1.165845	0.150126	226	1.452615	0.147475
184	1.172813	0.150039	227	1.461192	0.147418
185	1.179245	0.14996	228	1.469232	0.147365
186	1.18407	0.149902	229	1.475128	0.147327
187	1.189966	0.149831	230	1.483436	0.147273
188	1.196666	0.149752	231	1.490137	0.147231
189	1.203902	0.149668	232	1.496569	0.147191
190	1.208726	0.149613	233	1.503001	0.147151
191	1.216498	0.149526	234	1.507825	0.147122
192	1.224271	0.14944	235	1.515062	0.147078
193	1.230703	0.14937	236	1.522298	0.147035
194	1.237671	0.149296	237	1.527123	0.147007
195	1.242495	0.149245	238	1.533019	0.146972
196	1.247856	0.149189	239	1.539451	0.146935
197	1.254288	0.149123	240	1.544812	0.146905
198	1.260988	0.149055	241	1.549636	0.146878
199	1.268224	0.148983	242	1.557408	0.146834
200	1.273585	0.14893	243	1.56518	0.146792
201	1.280017	0.148867	244	1.570004	0.146765
202	1.286717	0.148803	245	1.576437	0.146731
203	1.293954	0.148735	246	1.582869	0.146696
204	1.301189	0.148668	247	1.590105	0.146658
205	1.308426	0.148602	248	1.597342	0.146621
206	1.31593	0.148535	249	1.603774	0.146588
207	1.323971	0.148464	250	1.610206	0.146555

Lampiran C – 1 Data thermal Analysis (lanjutan)

Data pasta *fly ash*

No	Time (Hour)	W/g			
1	0	0	39	0.239067	0.134215
2	0.004289	-0.04356	40	0.244427	0.13472
3	0.010721	-0.07925	41	0.250859	0.135277
4	0.017153	-0.08865	42	0.256755	0.135789
5	0.024389	-0.08503	43	0.26158	0.13629
6	0.031625	-0.07363	44	0.268012	0.136722
7	0.038058	-0.05922	45	0.274444	0.137081
8	0.045027	-0.04014	46	0.280877	0.137379
9	0.051995	-0.02251	47	0.287845	0.137603
10	0.057891	-0.00769	48	0.292669	0.137863
11	0.0662	0.004031	49	0.297493	0.138091
12	0.0729	0.013842	50	0.303925	0.138254
13	0.079332	0.027417	51	0.310893	0.138398
14	0.085764	0.039817	52	0.318666	0.138548
15	0.090053	0.051899	53	0.325903	0.138652
16	0.096485	0.062726	54	0.332334	0.138774
17	0.102917	0.070463	55	0.339303	0.138882
18	0.107741	0.079245	56	0.344127	0.138945
19	0.112566	0.086079	57	0.349487	0.139027
20	0.119801	0.091487	58	0.355919	0.139094
21	0.127038	0.095985	59	0.361815	0.139149
22	0.132934	0.099336	60	0.368248	0.139196
23	0.13883	0.103429	61	0.373072	0.13924
24	0.145262	0.107966	62	0.379504	0.139279
25	0.15223	0.112203	63	0.385936	0.139305
26	0.160271	0.114585	64	0.392368	0.139323
27	0.166703	0.116529	65	0.400944	0.139342
28	0.171527	0.118908	66	0.407377	0.139351
29	0.17796	0.121211	67	0.413809	0.13936
30	0.184928	0.12283	68	0.420241	0.139365
31	0.189752	0.125095	69	0.427477	0.139367
32	0.195113	0.126879	70	0.43525	0.139365
33	0.201545	0.128216	71	0.441682	0.13936
34	0.208782	0.129704	72	0.448918	0.139353
35	0.216018	0.131026	73	0.456155	0.139345
36	0.220843	0.1318	74	0.463392	0.139335
37	0.227275	0.132655	75	0.470628	0.139323
38	0.234243	0.133443	76	0.475453	0.139313
			77	0.481885	0.139299
			78	0.489121	0.139279

79	0.496357	0.139258	122	0.76115	0.138415
80	0.501182	0.139243	123	0.767582	0.138403
81	0.50815	0.139224	124	0.772406	0.13839
82	0.514582	0.139203	125	0.778302	0.138375
83	0.519406	0.139178	126	0.785003	0.13836
84	0.525838	0.139161	127	0.792239	0.138345
85	0.531734	0.139137	128	0.797063	0.138329
86	0.537631	0.139115	129	0.803495	0.138313
87	0.544599	0.139093	130	0.810464	0.138302
88	0.549959	0.139071	131	0.817432	0.138288
89	0.555319	0.139055	132	0.823864	0.138274
90	0.561752	0.139038	133	0.828688	0.138264
91	0.567647	0.139013	134	0.834048	0.138254
92	0.574884	0.138987	135	0.84048	0.13824
93	0.58212	0.138967	136	0.847181	0.138227
94	0.585336	0.138946	137	0.855489	0.138212
95	0.591768	0.138921	138	0.861921	0.138198
96	0.598201	0.138896	139	0.868889	0.138185
97	0.605973	0.138879	140	0.873714	0.138172
98	0.613209	0.138863	141	0.88095	0.138162
99	0.619641	0.138841	142	0.888186	0.138149
100	0.625002	0.138819	143	0.894618	0.138136
101	0.629826	0.138798	144	0.90105	0.138121
102	0.636794	0.138777	145	0.907482	0.138108
103	0.643226	0.138757	146	0.912307	0.138096
104	0.648051	0.138742	147	0.917131	0.138086
105	0.654483	0.138718	148	0.923563	0.138075
106	0.660915	0.138695	149	0.929996	0.138064
107	0.665739	0.13868	150	0.937232	0.138056
108	0.671099	0.13866	151	0.94554	0.138045
109	0.677531	0.138639	152	0.951436	0.138033
110	0.683428	0.138625	153	0.957869	0.138024
111	0.68986	0.138609	154	0.965105	0.138014
112	0.696828	0.13859	155	0.972341	0.138003
113	0.703796	0.138569	156	0.977165	0.137994
114	0.70862	0.138547	157	0.981989	0.137983
115	0.713445	0.138529	158	0.988421	0.137971
116	0.720681	0.138516	159	0.996462	0.137959
117	0.727917	0.1385	160	1.004502	0.137948
118	0.735957	0.138482	161	1.009862	0.137938
119	0.743997	0.138463	162	1.016294	0.137929
120	0.75043	0.138451	163	1.02219	0.137918
121	0.754718	0.138433	164	1.028623	0.137907

165	1.035591	0.137898	208	1.329331	0.137566
166	1.042559	0.137888	209	1.335763	0.13756
167	1.0506	0.137881	210	1.342999	0.137552
168	1.057568	0.137873	211	1.350772	0.137547
169	1.063464	0.137864	212	1.357204	0.137542
170	1.069896	0.137855	213	1.365244	0.137537
171	1.076328	0.137846	214	1.373284	0.137531
172	1.083565	0.137838	215	1.378645	0.137525
173	1.091338	0.137828	216	1.385077	0.13752
174	1.09777	0.137819	217	1.392313	0.137514
175	1.105006	0.137809	218	1.400085	0.137509
176	1.112779	0.1378	219	1.406517	0.137503
177	1.119211	0.137793	220	1.413754	0.137498
178	1.126447	0.137786	221	1.421526	0.137493
179	1.133683	0.137778	222	1.425814	0.137487
180	1.141724	0.13777	223	1.43171	0.13748
181	1.1503	0.137762	224	1.438143	0.137475
182	1.15834	0.137754	225	1.445379	0.13747
183	1.165845	0.137745	226	1.452615	0.137466
184	1.172813	0.137736	227	1.461192	0.137461
185	1.179245	0.13773	228	1.469232	0.137455
186	1.18407	0.137722	229	1.475128	0.137452
187	1.189966	0.137714	230	1.483436	0.137446
188	1.196666	0.137707	231	1.490137	0.137442
189	1.203902	0.137702	232	1.496569	0.137438
190	1.208726	0.137694	233	1.503001	0.137433
191	1.216498	0.137687	234	1.507825	0.137429
192	1.224271	0.13768	235	1.515062	0.137424
193	1.230703	0.137673	236	1.522298	0.137419
194	1.237671	0.137667	237	1.527123	0.137416
195	1.242495	0.137659	238	1.533019	0.137411
196	1.247856	0.137649	239	1.539451	0.137406
197	1.254288	0.137641	240	1.544812	0.137401
198	1.260988	0.137634	241	1.549636	0.137397
199	1.268224	0.137627	242	1.557408	0.137392
200	1.273585	0.13762	243	1.56518	0.137388
201	1.280017	0.137612	244	1.570004	0.137383
202	1.286717	0.137604	245	1.576437	0.137379
203	1.293954	0.137598	246	1.582869	0.137374
204	1.301189	0.137591	247	1.590105	0.137369
205	1.308426	0.137584	248	1.597342	0.137366
206	1.31593	0.13758	249	1.603774	0.137361
207	1.323971	0.137573	250	1.610206	0.137355

Lampiran D – 1 Alat-alat uji

