

TUGAS AKHIR TERAPAN - RC146599

## REKAYASA BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH

ABDUL KARIM YASIN  
NRP 3116040505

Dosen Pembimbing  
Ridho Bayuaji, S.T., M.T., Ph.d  
NIP. 19730710 199802 1 002

Tri Eddy Susanto, S.T., M.T  
NIK. 811 PT. *Semen Indonesia (persero) Tbk*

PROGRAM STUDI DIPLOMA EMPAT LANJUT JENJANG TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL  
FAKULTAS VOKASI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017



**TUGAS AKHIR TERAPAN - RC146599**

## **REKAYASA BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH**

**ABDUL KARIM YASIN**  
NRP 3116040505

**DOSEN PEMBIMBING**  
Ridho Bayuaji, S.T., M.T., Ph.d  
NIP. 19730710 199802 1 002

Tri Eddy Susanto, S.T., M.T  
NIK. 811 PT. *Semen Indonesia (persero) Tbk*

**PROGRAM STUDI DIPLOMA EMPAT LANJUT JENJANG TEKNIK SIPIL**  
**DEPARTEMEN TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL**  
**FAKULTAS VOKASI**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA 2017**



APPLIED FINAL PROJECT - RC146599

# ENGINEERING ON FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE

ABDUL KARIM YASIN  
NRP 3116040505

Counsellor Lecturer  
Ridho Bayuaji, S.T., M.T., Ph.d  
NIP. 19730710 199802 1 002

Tri Eddy Susanto, S.T., M.T  
NIK. 811 PT. *Semen Indonesia (persero) Tbk*

STUDY PROGRAM OF DIPLOMA FOUR CIVIL ENGINEERING CONTINUING STUDY  
DEPARTMENT OF CIVIL INFRASTRUCTURE ENGINEERING  
VOCATIONAL FACULTY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017

## HALAMAN PENGESAHAN

REKAYASA BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Terapan (S.Tr)

Pada

Bidang Studi Material dan Struktur Gedung

Program Studi D-4 Teknik Sipil

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya, 7 Juli 2017

Oleh  


ABDUL KARIM YASIN

NRP. 3116040505

Disetujui Oleh Pembimbing Tugas Akhir Terapan :



Pembimbing 2



PT. SEMEN INDONESIA

Tri Eddy Susanto, S.T., M.T  
NIK. 811 (PT. Semen Indonesia)

2 JUL 2017

## REKAYASA BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH

Nama Mahasiswa : Abdul Karim Yasin  
NRP : 3116040505  
Departemen : Teknik Infrastruktur Sipil FV-ITS  
Dosen Pembimbing I : Ridho Bayuaji, S.T., M.T., Ph.D  
NIP : 19730710 199802 1 002  
Pembimbing II : Tri Eddy Susanto, S.T., M.T  
NIK : 811 PT. Semen Indonesia (persero) Tbk

### **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk merencanakan suatu beton geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering. Selama ini, beton geopolimer umumnya menggunakan metode basah, dimana material pengikatnya berupa suatu campuran antara larutan alkali dan Fly Ash atau material pozzolan lainnya. Sedangkan jika menggunakan metode kering, bahan pengikatnya berupa semen geopolimer yang terdiri dari Fly Ash dan aktifator padat berupa NaOH dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang digiling halus menjadi satu kesatuan.

Terdapat 3 (tiga) fase penelitian yang harus dilakukan dalam mewujudkan pembuatan beton geopolimer dengan metode pencampuran kering, yaitu penelitian pada: material penyusun, semen geopolimer, dan beton semen geopolimer. Pada proses pembuatan semen geopolimer dibuat variabel kandungan aktifator sebesar 15; 17,5; dan 20% dari total kandungan semen geopolimer. Benda uji pasta semen dibuat dengan kadar tersebut, lalu dilakukan pengujian setting time dan kuat tekan untuk dapat mengetahui performanya. Selanjutnya campuran yang paling optimum tersebut di gunakan untuk penelitian beton semen geopolimer. Pada proses pembuatan beton, dibuat variabel konten semen dengan kadar 360, 480, dan 720  $\text{Kg/m}^3$  dari total berat jenis beton ( $2400 \text{ Kg/m}^3$ ). untuk mengetahui karakteristik mutunya, maka dilakukan pengujian baik destruktif dan non destruktif.

Dari hasil penelitian ini, pada fase pembuatan semen geopolimer, variabel campuran 17,5% aktifator : 82.5% Fly Ash merupakan campuran yang optimum untuk semen geopolimer berdasarkan hasil pengujian waktu ikat dengan waktu 150 menit, hampir menyamai semen portland, yaitu 153 menit dan lebih lambat dari geopolimer metode basah yaitu 5 – 58 menit, dan kuat tekan pada 14 hari mencapai 422 Kg/cm<sup>2</sup>. Kemudian, pada fase pembuatan beton geopolimer, variabel konten semen 360 dan 480 Kg/m<sup>3</sup> memiliki karakteristik beton dengan mutu non struktural, dengan nilai kuat tekan rata-rata pada umur 28 hari masing-masing 30,13 Kg/cm<sup>2</sup> dan 140,67 Kg/cm<sup>2</sup>, sedangkan variabel konten semen 720 Kg/m<sup>3</sup> memiliki karakteristik beton dengan mutu struktural dengan nilai kuat tekan rata-rata pada umur 28 hari sebesar 426,67 Kg/cm<sup>2</sup>. Keunggulan utama dari beton semen geopolimer ini adalah salah satu solusi penanggulangan permasalahan waktu ikat pada geopolimer.

Kata kunci : beton geopolimer, berbasis Fly Ash, metode pencampuran kering, semen geopolimer, waktu ikat.

## *ENGINEERING ON FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE*

Student's Name : Abdul Karim Yasin  
NRP : 3116040505  
Department : Civil Infrastructures Engineering FV-ITS  
Supervisor's I : Ridho Bayuaji, S.T., M.T., Ph.D  
NIP : 19730710 199802 1 002  
Supervisor's II : Tri Eddy Susanto, S.T., M.T  
NIK : 811 PT. Semen Indonesia (persero) Tbk

### ***Abstract***

*This research is aimed for engineered some geopolymer concrete with dry mix methods. All this time, generally it is used by wet methods, when the binder materials are formed of some mixtures between alkali activators and Fly Ash or other pozzolanic materials. In other hand, if used dry mix methods, the binder materials is called geopolymer cements, the cements were formed by grinding process of Fly Ash and solid alkali activator materials such as NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> become one.*

*There are 3 (three) research phases which must be done to realize the geopolymer concrete with dry mix methods. Those research phases including: raw materials, geopolymer cements, and geopolymer cements concrete. On geopolymer cements manufacturing process, variable of activator contents that used are: 15; 17.15; and 20% from total contents of geopolymer cements. Testing specimens of cement paste are be made by its contents. Then, setting time and compressive strength tests are did to know its performance. And next, the most optimum mixture variable will be used by geopolymer concrete research phase. On the concrete manufacturing process, variable of the cement contents that used are: 360, 480, 600 and 720 Kg/m<sup>3</sup> from total weight of concrete density (2400 Kg/m<sup>3</sup>). Then, destructive and non-destructive test are did to know its quality characteristics.*

*According to this research, on the cement phase, mixture variable of 17.5% activator : 82.5% Fly Ash content as a optimum mixtures based on setting time with 150 minutes, almost equal to portland cement, that is 153 minutes, and slower than geopolymer with wet mixing method, there are 5 – 48 minutes, and also have an average compressive strength test at 14 days reach to 422 Kg/cm<sup>2</sup>. Then, on the concrete phase, cement content variables of 360 and 480 kg/m<sup>3</sup> are have non-structural quality of concrete, with each averages compressive strength oat 28 days 30,13 Kg/cm<sup>2</sup> and 140 Kg/cm<sup>2</sup>. On other hand, cements content variable of 720 kg/m<sup>3</sup> have structural quality of concrete with average compressive strength at 28 days 426,67 Kg/cm<sup>2</sup>. The main excellence is one of solutions about setting time problem in geopolymer.*

*Keywords : geopolymer concrete, Fly Ash based, dry mix methods, geopolymer cements, setting time.*



## KATA PENGANTAR

Bismillahir Rahmaanir Raḥiim Al Ḥamdulillāhi Rabbil ‘Aa-lamiin, hanya dengan rahmat dan hidayah-Nya kami dapat menyelesaikan tugas akhir terapan yang berjudul **“Rekayasa Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash”**. Tugas akhir terapan ini mendiskripsikan apa saja yang penulis kerjakan tentang penelitian dengan judul tersebut.

Penulis bermaksud mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang mendukung dan membantu atas terselesainya penulisan tugas akhir terapan ini, yaitu kepada:

1. Bapak Ridho Bayuaji, S.T., M.T., Ph.D, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dukungan dan bimbingan.
2. Bapak Tri Eddy Susanto, S.T., M.T, selaku pembimbing penelitian selama pelaksanaan penelitian di Lab Aplikasi Produk PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, yang telah memberikan arahan, masukan, dukungan, dan bimbingan.
3. Bapak/Ibu Dosen Departemen Teknik Infrastruktur Sipil yang tidak dapat saya tulis satu-persatu, yang telah memberikan ilmu selama penulis belajar di bangku perkuliahan.
4. Bapak Ismail Yasin dan Ibu Zakiyatul Anifah, S.Pd.I, selaku orang tua, yang telah mendukung dan mendoakan penulis dalam pelaksanaan tugas akhir terapan ini.

Dalam tugas akhir terapan ini, kami menyadari, bahwa apayang penulis kerjakan masih sangat jauh dari kesempurnaan, Dengan rasa hormat, penulis mohon petunjuk, saran dan kritik terhaap katya ini, sehingga kedepan diharapkan ada perbaikan terhadap karya ini dan dapat menambah pengetahuan bagi penulis.

Surabaya, 07 Juli 2017

Abdul Karim Yasin

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## DAFTAR ISI

Abstrak .....	i
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat.....	5
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Definisi dan Perbedaan Bahan Pengikat Geopolimer Metode Pencampuran Kering dan Basah.....	7
2.1.1 Definisi .....	7
2.1.2 Perbedaan .....	8
2.2 Material Penyusun .....	9
2.2.1 Sodium Hidroksida (NaOH).....	9
2.2.2 Sodium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) .....	10
2.2.3 Fly Ash .....	11
2.3 Parameter yang diperlukan dalam membuat desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering.....	13
2.3.1 Perbandingan Fly Ash terhadap padatan aktivator 14	
2.3.2 Perbandingan Padatan NaOH terhadap Padatan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .....	16
2.3.3 Perbandingan Air terhadap Semen Geopolimer (Rasio W/C).....	16
2.3.4 Merangkum parameter dalam desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering .....	17

2.4	Penelitian sebelumnya beton geopolimer berbasis Fly Ash metode pencampuran basah dan analisisnya untuk metode pencampuran kering.....	18
2.4.1	<i>Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete</i> , (Hardjito, 2005).....	19
2.4.2	<i>Modified Guildelines for Geopolymer Concrete (Fly Ash-Based Geopolymer) Mix Design Using Indian Standard</i> , (Anuradha et al, 2011).....	30
2.5	Rangkuman Parameter optimum dalam mendesain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering (semen geopolimer).....	39
2.6	Perhitungan desain campuran beton geopolimer berbasis Fly Ash metode pencampuran kering .....	44
2.7	Pengujian-pengujian pada material penyusun, pasta, dan beton .....	50
2.7.1	Pengujian pada material penyusun (XRF,XRD, PSD) .....	50
2.7.2	Pengujian pada pasta dan Beton (Waktu Ikut, Kuat Tekan dan UPV).....	51
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....		57
3.1	Tahapan Pelaksanaan Penelitian.....	57
3.2	Detail Metodologi Pelaksanaan Penelitian .....	58
3.2.1	Pengumpulan dan Pengujian Material Penyusun	58
3.2.2	Pembuatan dan Pengujian Semen Geopolimer....	71
3.2.3	Pembuatan dan Pengujian Beton Semen Geopolimer.....	88
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....		99
4.1	Spesifikasi Material Penyusun.....	99
4.1.1	Fly Ash .....	99
4.1.2	Aktivator.....	102
4.1.3	Agregat .....	103
4.2	Performa Semen dan Pasta Semen Geopolimer .....	106
4.2.1	Hasil Pengujian PSD Semen Geopolimer.....	106
4.2.2	Waktu Ikut Pasta.....	107
4.2.3	Kuat Tekan Pasta.....	109

4.3	Performa Beton Semen Geopolimer .....	110
4.3.1	Kuat Tekan Beton .....	110
4.3.2	UPV ( <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> ) .....	113
4.3.3	Estimasi Nilai Kuat Tarik Belah Beton dan Modulus Elastisitas .....	113
4.4	Analisa Harga Bahan Produksi Beton Semen Geopolimer 114	
4.4.1	Tinjauan dengan Harga Aktivator Skala Retail .	114
4.4.2	Tinjauan dengan Harga Aktivator Skala Komersial (Supplier).....	115
4.5	Potensi Keunggulan .....	117
BAB V PENUTUP .....		119
5.1	Kesimpulan.....	119
5.2	Saran .....	121
DAFTAR PUSTAKA.....		123
BIODATA PENULIS.....		127
LAMPIRAN .....		129

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Serangkaian proses pembuatan geopolimer metode pencampuran basah (CSIR-NML, 2016).....	7
Gambar 2. 2 Serangkaian proses pembuatan geopolimer metode pencampuran kering (Tri Eddy, 2016) .....	8
Gambar 2. 3 Diagram alir penyajian binder geopolimer: metode pencampuran basah (a) [Yun Ming et al, 2016] , metode pencampuran kering (b) [Tri Eddy, 2016].....	8
Gambar 2. 4 NaOH dalam wujud flake (a) [Dok. Pribadi, 2016]; NaOH dalam wujud larutan dengan konsentrasi tertentu (b) [CSIR-NML, 2016] .....	10
Gambar 2. 5 Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> dalam wujud granular (a) [Dok. Pribadi, 2016]; Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> dalam wujud larutan atau disebut <i>water glass</i> (b) [CSIR-NML, 2016] .....	11
Gambar 2. 6 Low Calcium Fly Ash (a); High Calcium Fly Ash (b) .....	12
Gambar 2. 7 Sifat masing-masing jenis batu bara dan kelas nya ( <a href="http://www.ems.psu.edu/~radovic/Chapter7.pdf">http://www.ems.psu.edu/~radovic/Chapter7.pdf</a> ) .....	13
Gambar 2. 8 <i>Coal Rank</i> , dari kiri: Lignite, Sub-bituminous, Bituminous, dan Anthracite.....	13
Gambar 2. 9 PSD Fly Ash Batch 1 (Hardjito, 2005).....	20
Gambar 2. 10 PSD Fly Ash Batch 2 (Hardjito, 2005).....	20
Gambar 2. 11 PSD Fly Ash Batch 2 (Hardjito, 2005).....	21
Gambar 2. 12 Hasil pengujian kuat tekan beton campuran 2 dan 4 pada umur 7 hari dengan temperature curing 30°C, 60°C, dan 90°C.....	23
Gambar 2. 13 Hasil pengujian kuat tekan dari masing-masing variasi campuran beton geopolimer berbasis Fly Ash (Anuradha et al, 2011).....	32
Gambar 2. 14 Kuat tekan yang dihasilkan dari masing-masing variasi campuran (Anuradha et al, 2011) .....	41
Gambar 2. 15 Pengaruh kadar aktivator terhadap nilai kuat tekan dari masing-masing variasi campuran (Anuradha et al, 2011)....	41

Gambar 2. 16 Pengaruh rasio NaOH : Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> padat terhadap nilai kuat tekan (Anuradha et al, 2011) .....	42
Gambar 2. 17 Pengaruh rasio w/c padat terhadap nilai kuat tekan (Anuradha et al, 2011).....	43
Gambar 2. 18 Grafik Zona Agregat Gabungan untuk Ukuran Maksimum Agregat 10 mm (SNI 2834-2000) .....	46
Gambar 2. 19 Grafik Zona Agregat Gabungan untuk Ukuran Maksimum Agregat 20 mm (SNI 2834-2000) .....	46
Gambar 2. 20 Grafik Zona Agregat Gabungan untuk Ukuran Maksimum Agregat 40 mm (SNI 2834-2000) .....	47
Gambar 2. 21 Grafik Zona Gradasi Agregat Halus (SNI 2834-2000).....	48
Gambar 2. 22. Grafik Zona Gradasi Agregat Kasar (SNI 2834-2000).....	48
Gambar 2. 23 Alat Vicat dan Cetakan Benda Uji (a) dan Contoh Grafik Penetrasi Jarum Vicat pada Pengujian Waktu Ikat (b).....	52
Gambar 2. 24 Trendline (Power) dan Persamaan untuk Mengestimasi Nilai Kuat Tarik Belah Beton Atau Split Tensile Strength melalui Hasil Pengujian Kuat Tekan (Hardjito, 2005)..	54
Gambar 2. 25 Metode Penyebaran dan Penerimaan Gelombang Pulsa Ultrasonic: (a) Direct Transmission, (b) Semi-Direct Transmission, dan Indirect / Surface Transmission (Neville dan Brooks, 2010) .....	55
Gambar 3. 1 Fase Kegiatan Penelitian Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash .....	57
Gambar 3. 2 Diagram Alir Kegiatan Penelitian Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash.....	58
Gambar 3. 3 Dokumentasi: Pengujian XRF di Lab. PT. Semen Gresik Pabrik Tuban (a), Pengujian LOI di Lab. Fisika PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, Gresik .....	60
Gambar 3. 4 Wujud Fisik Fly Ash PLTU Paiton PT. IPMOMI ..	60
Gambar 3. 5 Pola XRD dan kandungan mineral pada Fly Ash PLTU PT. IPMOMI Paiton, Jawa Timur, Indonesia .....	61



Gambar 3. 6 Grafik Sebaran Ukuran Partikel (Particle Size Distribution-PSD) pada Fly Ash PLTU PT. IPMOMI Paiton, Jawa Timur, Indonesia .....	62
Gambar 3. 7 Dokumentasi Pengujian PSD di Lab. PSD PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, Gresik: (a) Instrumen Malvern MS (Mastersizer) 2000, (b) Software pengolah data PSD .....	63
Gambar 3. 8 Alkali Aktivator padat: (a) NaOH Flake, (b) $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Granular .....	64
Gambar 3. 9 Grafik Gradasi Agregat Halus Pasir Lumajang yang Menunjukkan Hasil Zona 2 .....	67
Gambar 3. 10 Grafik Gradasi Agregat Kasar Batu Pecah Pasuruan yang Menunjukkan Hasil Zona Maks. Ukuran Agregat 10 mm..	67
Gambar 3. 11 Grafik Gradasi Agregat Gabungan Halus Pasir Lumajang dan Batu Pecah Pasuruan dengan hasil komposisi 40% Agregat Halus dan 60% Agregat Kasar.....	69
Gambar 3. 12 Preparasi Agregat: (a) Agregat Halus Diatur % Kadar Setiap Ukuran Butirannya Agar Memenuhi Zona 2, (b) Agregat Kasar Dibuat Berukuran 5 – 10 mm melalui proses Crushing untuk dapat digunakan dalam pembuatan beton dengan cetakan kubus $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ .....	69
Gambar 3. 13 Ukuran Butiran Agregat Halus yang Digunakan untuk Memenuhi Zona 2: (a) 1,18 mm (27,5%); (b) 0,6 mm (25,5%); (c) 0,3 mm (28,0%); (d) 0,15 mm (19,0%) .....	70
Gambar 3. 14 Kombinasi Ukuran Butir Agregat Kasar yang Digunakan: (a) 5 mm (40%), (b) 10 mm (60%) .....	70
Gambar 3. 15 Diagram Alir Proses Pembuatan dan Pengujian Semen Geopolimer .....	71
Gambar 3. 16 Benda Uji Pasta Semen Geopolimer Kondisi Keras dengan Variabel Awal: 85:15 (V1), 80:20 (V2), 75:25 (V3), 70 : 30 (V4) .....	73
Gambar 3. 17 Variabel Awal 75:25 (V3) dan 70:30 (V4) dengan konten aktivator yang tinggi menyisakan butiran aktivator (Sodium Silikat Pentahidrat) yang tidak bereaksi .....	73
Gambar 3. 18 Trial Mengetahui Rasio Air Terhadap Semen Geopolimer yang Aktual Terjadi.....	75

Gambar 3. 19 Sketsa Mesin Ball Mill Skala Lab yang Digunakan dalam Penelitian Ini (Produk BICO Company USA).....	76
Gambar 3. 20 Wujud Mesin Ball Mill yang Digunakan: (a) Tampak Luat Mesin, (b) 285 Bola Penggilas dengan Berat Total 44,5 lb.....	76
Gambar 3. 21 Menyiapkan Material Penyusun Semen Geopolimer dengan Massa Total 3 Kg.....	77
Gambar 3. 22 Memastikan tabung dan Bola dalam Keadaan Kering dan Tidak Terkontaminasi Material Lain.....	77
Gambar 3. 23 Urutan Memasukan Material: (a) Fly Ash (1/2), (b) Sodium Hidroksida (c) Sodium Silikat Pentahidrat, (d) Fly Ash (1/2).....	78
Gambar 3. 24 (a) Menutup Tabung Ball Mill, (b) Mesin Ball Mill Mulai Penggilingan dengan Durasi 10 Menit.....	78
Gambar 3. 25 (a) Tabung Ball Mill Dibuka, (b) Semen Geopolimer Dikemas Dalam Plastik Kedap Udara.....	79
Gambar 3. 26 (a) Pasir Silika Dimasukan Ke Dalam Tabung Ball Mill, (b) Wujud Fisik Pasir Silika.....	79
Gambar 3. 27 Grafik PSD pada: Fly Ash, dan Variabel 1 – 4 Semen Geopolimer Menggunakan Instrumen Malvern MS (Mastersizer) 2000 di Lab PSD PT. Semen Indonesia (persero) Tbk.....	80
Gambar 3. 28 Semen Geopolimer Sebanyak 300 gr Disiapkan ..	81
Gambar 3. 29 Alat Vicat dan Cetakan Benda Uji Disiapkan .....	81
Gambar 3. 30 Membuat Adonan Pasta Semen Geopolimer Untuk Benda Uji Vicat.....	81
Gambar 3. 31 Adonan Diaduk Hingga Homogen .....	82
Gambar 3. 32 Adonan Pasta Dimasukan Ke Dalam Cetakan.....	82
Gambar 3. 33 Mencatat Penurunan Jarum Vicat Setiap 15 Menit .....	83
Gambar 3. 34 Mencatat Penurunan Jarum Vicat dan Menemukan Nilai Waktu Ikatan Awal Semen Geopolimer Apabila Penurunan Jarum Mencapai Angka 25 mm.....	83
Gambar 3. 35 Masing-Masing Variabel Semen Geopolimer Disiapkan untuk Pembuatan Benda Uji Pasta Kuat Tekan.....	84

Gambar 3. 36 Memasukan Semen Geopolimer Ke Dalam Wadah Pengaduk .....	85
Gambar 3. 37 Memasukan Air Sesuai Takaran Rasio Air Terhadap Semen Masing-Masing Variabel yang Telah Ditentukan .....	85
Gambar 3. 38 Mengaduk Adonan Pasta Segar Semen Geopolimer Hingga Homogen .....	85
Gambar 3. 39 (a) Adonan Pasta Semen Geopolimer Dituang Ke Dalam Benda Uji Kubus, (b) Cetakan Kubus Setelah Terisi Penuh Oleh Pasta Semen Geopolimer .....	86
Gambar 3. 40 (a) Benda Uji Pasta Umur 1 (satu) Hari Setelah Dilepas Dari Bekisting, (b) Curing dengan Metode Pelapisan Membran Plastik pada Suhu Ruang .....	86
Gambar 3. 41 Mesin Pengujian Kuat Tekan Produksi Tinius Olsen Company .....	87
Gambar 3. 42 (a) Benda Uji Disiapkan, (b) Benda Uji Dalam Proses Pengujian Kuat Tekan, (c) Benda Uji Setelah Pengujian Kuat Tekan .....	87
Gambar 3. 43 Diagram Alir Pembuatan dan Pengujian Beton Semen Geopolimer .....	88
Gambar 3. 44 Material Penyusun Beton Semen Geopolimer, Dari Kanan: Semen Geopolimer, Agregat Halus, dan Agregat Kasar	91
Gambar 3. 45 Menyiapkan Alat Pengaduk (Hand Mixer dan Wadah) serta Cetakan Kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm .....	91
Gambar 3. 46 Memasukan Semen Geopolimer .....	91
Gambar 3. 47 Memasukan Air Sesuai Rasio Air terhadap Semen Geopolimer yang Telah Ditentukan .....	92
Gambar 3. 48 Adonan Semen geopolimer dan Air (pasta) yang Telah Ditambahkan Hingga Homogen .....	92
Gambar 3. 49 (a) Agregat Kasar masuk, (b) diikuti Agregat Halus .....	92
Gambar 3. 50 (a) Pengadukan Adonan Beton Semen Geopolimer Segar, (B) Beton Geopolimer Segar yang Telah Diaduk Hingga Homogen .....	93

Gambar 3. 51 Adonan beton segar dicetak kedalam benda uji kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm.....	93
Gambar 3. 52 Proses Curing Beton Semen Geopolimer dengan Metode <i>Polythene Curing</i> dalam Suhu Ruang .....	94
Gambar 3. 53 Instrumen UPV (Produk Proceq Company) dan Benda Uji Beton Semen Geopolimer Umur 28 Hari .....	95
Gambar 3. 54 Distance (jarak) pada Instrument UPV Diatur Sesuai Dimensi Benda Uji.....	95
Gambar 3. 55 Proses Pemancaran Gelombang UPV pada Benda Uji Beton Semen Geopolimer.....	96
Gambar 3. 56 Output Pengujian UPV terdiri dari: Waktu Rambat (t), Jarak Rambat (l), Kecepatan Rambat Gelombang UPV (v).....	96
Gambar 3. 57 Proses Pengujian Kuat Tekan Beton Semen Geopolimer: (a) Menyiapkan Benda Uji, (b) Proses Pengujian, (c) Beton Dalam Keadaan Ultimate, (d) Beton Setelah Diuji Kuat Tekan .....	97
Gambar 4. 1 Pola XRD Fly Ash PT. IPMOMI yang Digunakan pada Penelitian ini, mineral yang terkandung ialah: hkl_amorph, Quartz, Periclase, Lime, Brownmillerite, Spurrite, Magnetite, Maghemite, dan Anyhidrite.....	100
Gambar 4. 2 Size Distribution Plot Fly Ash PT. IPMOMI yang Digunakan Pada Penelitian Ini .....	101
Gambar 4. 3 Gradasi Agregat Kasar Batu Pecah Pasuruan Menunjukkan Hasil Zona Maks 10 mm .....	103
Gambar 4. 4 Gradasi Agregat Halus Pasir Lumajang Menunjukkan Hasil Zona 2 .....	104
Gambar 4. 5 Grafik Agregat Gabungan untuk Ukuran Agregat Maks 10 mm dan Komposisi 60% Agregat Kasar : 40% Agregat Halus Memenuhi Syarat Grafik Zona Agregat Gabungan Tersebut .....	106
Gambar 4. 6 Size Distribution Plot Masing-Masing Variabel Semen Geopolimer .....	106
Gambar 4. 7 Grafik Pengujian Waktu Ikat Pasta Seluruh Variabel Semen Geopolimer .....	108

Gambar 4. 8 Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan Rata-Rata (Dari 2 Benda Uji Per-Pengujian) Pasta Seluruh Variabel Semen Geopolimer Umur 3, 7, dan 14 Hari.....	109
Gambar 4. 9 Grafik Nilai Kuat Tekan Seluruh Variabel Semen Geopolimer.....	111
Gambar 4. 10 Grafik Korelasi Umur Pengujian Terhadap Pertumbuhan Nilai Kuat Tekan Beton Semen Geopolimer .....	112

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbedaan proses penyajian binder geopolimer dengan metode basah dan kering .....	8
Tabel 2. 2 Persyaratan Kimia Fly Ash (ASTM C618-12).....	12
Tabel 2. 3 Notasi pada masing-masing material geopolimer metode pencampuran basah.....	14
Tabel 2. 4 Perbandingan berat NaOH padat dan Air dalam beberapa konsentrasi molar larutan NaOH.....	14
Tabel 2. 5 Notasi dari prosentase kandungan oksida dalam larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .....	15
Tabel 2. 6 Parameter Desain Campuran Bahan Pengikat Geopolimer Berbasis Fly Ash dengan Metode Pencampuran Kering.....	18
Tabel 2. 7 Komposisi Fly Ash berdasarkan hasil perngujian XRF (Hardjito, 2005).....	19
Tabel 2. 8 Hasil tes PSD ( <i>Particle Size Distribution</i> ) Fly Ash (Hardjito, 2005).....	21
Tabel 2. 9. Variasi molar dalam suatu larutan NaOH (Hardjito, 2005).....	22
Tabel 2. 10 Komposisi kimia larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (Hardjito, 2005).22	
Tabel 2. 11 Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran basah untuk campuran 2 dan 4 (Hardjito, 2005) .....	23
Tabel 2. 12 Desain campuran 2 dan 4 geopolimer berbasis Fly Ash (Hardjito, 2005).....	23
Tabel 2. 13 Detail hasil pengujian kuat tekan pada campuran 2 dan 4 (Hardjito, 2005) .....	24
Tabel 2. 14 Massa material geopolimer berbasis Fly-Ash metode pencampuran basah Campuran-2 (Hardjito, 2005) .....	24
Tabel 2. 15 Perbandingan berat NaOH padat dan Air dalam beberapa konsentrasi molar larutan NaOH (Hardjito, 2005).....	25
Tabel 2. 16 % kandungan oksida dalam larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (Hardjito, 2005).....	25

Tabel 2. 17 Perbandingan nilai massa pada desain campuran bahan pengikat geopolimer metode basah dan kering pada Campuran 2 .....	28
Tabel 2. 18 Perbandingan nilai massa pada desain campuran bahan pengikat geopolimer metode basah dan kering pada Campuran 4 .....	29
Tabel 2. 19 Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering Campuran 2 .....	29
Tabel 2. 20 Komposisi kimia larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (Anuradha et al, 2011).....	30
Tabel 2. 21 Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran basah untuk campuran 1 hingga 12 (Anuradha et al, 2011) .....	31
Tabel 2. 22 Desain campuran 1 – 12 beton geopolimer berbasis Fly Ash (Anuradha, 2011).....	31
Tabel 2. 23 Detail hasil pengujian kuat tekan pada masing-masing variasi campuran beton geopolimer berbasis Fly Ash (Anuradha et al, 2011).....	32
Tabel 2. 24 Massa masing-masing material geopolimer berbasis Fly-Ash metode pencampuran basah Campuran-1 (Anuradha et al, 2011).....	33
Tabel 2. 25 Perbandingan berat NaOH padat dan Air dalam beberapa konsentrasi molar larutan NaOH (Anuradha et al, 20011).....	34
Tabel 2. 26 % kandungan oksida dalam larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (Anuradha et al, 2011).....	34
Tabel 2. 27 Perbandingan nilai massa pada desain campuran bahan pengikat geopolimer metode basah dan keringa masing-masing variasi campuran pada penelitain Anuradha et al, 2011..	37
Tabel 2. 28 Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering masing-masing variasi campuran pada penelitain Anuradha et al, 2011 .....	38



Tabel 2. 29 Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering hasil konversi serta kuat tekan beton yang dihasilkan pada penelitian Hardjito, 2005.....	39
Tabel 2. 30 Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering hasil konversi serta kuat tekan beton yang dihasilkan pada penelitian Anuradha et al, 2011 .....	40
Tabel 2. 31 Rangkuman parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering .....	43
Tabel 2. 32 Klasifikasi kadar semen pada beton semen portland (Civil Engineering Memphis University, 2016).....	45
Tabel 2. 33 Tabel untuk menggambarkan batasan gradasi agregat gabungan dengan beberapa ukuran butir maksimum agregat (SNI 2834-2000) .....	45
Tabel 2. 34 Zona Gradasi Agregat Halus (SNI 2834-2000).....	47
Tabel 2. 35 Zona Gradasi Agregat Kasar (SNI 2834-2000).....	48
Tabel 2. 36 Komposisi Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash dengan Metode Pencampuran Kering (Semen Geopolimer) dan Notasinya.....	49
Tabel 2. 37 Standar dan Notasi Pengujian Kadar Air dan Penyerapan Agregat .....	49
Tabel 2. 38 Macam-Macam Bentuk dan Dimensi Sampel Pengujian Kuat Tekan .....	53
Tabel 2. 39 Umur Pengujian Beton dan Korelasinya dalam beton semen portland (PBI 1971).....	53
Tabel 2. 40 Klasifikasi Mutu Beton Berdasarkan Nilai Kuat Tekan (DPU, 2007) .....	54
Tabel 2. 41 Kriteria Kecepatan Gelombang Pulsa untuk Mengklasifikasi Kualitas Beton (IS 1331101-1992).....	56
Tabel 3. 1 Komposisi Kimia Fly Ash yang Ditetapkan Berdasarkan Pengujian XRF dan LOI.....	59
Tabel 3. 2 Kandungan Mineral pada Fly Ash PLTU PT. IPMOMI Paiton, Jawa Timur, Indonesia Hasil Pengujian XRD .....	61

Tabel 3. 3 partikel yang tertahan dan tertahan kumulatif di masing-masing ukuran pengujian PSD pada Fly Ash PLTU PT. IPMOMI Paiton, Jawa Timur, Indonesia.....	62
Tabel 3. 4 Tipikal Komposisi Kimia pada Sodium Hidroksida Flake 98% (Cristal Company, 2016) .....	64
Tabel 3. 5 Tipikal Komposisi Senyawa Kimia pada Sodium Silikat Pentahidrat (PQ Corporation, 2009) .....	65
Tabel 3. 6 Hasil Pengujian Analisa Ayakan Agregat Halus Pasir Lumajang, Jawa Timur, Indonesia .....	65
Tabel 3. 7 Hasil Pengujian Analisa Ayakan Agregat Kasar Batu Pecah Pasuruan, Jawa Timur, Indonesia .....	66
Tabel 3. 8 Tabel hasil Analisa Agregat Gabungan Pasir Lumajang dan Batu Pecah Pasuruan.....	68
Tabel 3. 9 Variabel Komposisi Campuran Semen Geopolimer ..	72
Tabel 3. 10 Hasil Pengujian Kuat Tekan Trial Variabel Awal Pasta Semen Geopolimer.....	73
Tabel 3. 11 Analisa Harga Perbandingan Kombinasi Aktivator NaOH terhadap $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .....	74
Tabel 3. 12 Rasio Air Terhadap Semen Geopolimer yang Terjadi dalam Suatu Campuran Pasta .....	75
Tabel 3. 13 Variabel Penelitian Beton Semen Geopolimer (Prosentase Komposisi) .....	89
Tabel 3. 14 Komposisi Desain Campuran Beton Geopolimer Masing-Masing Variabel.....	89
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian XRF Fly Ash yang Digunakan dengan Parameter ASTM C618-12.....	99
Tabel 4. 2 Kandungan Mineral Hasil Pengujian XRD Terhadap Fly Ash yang Digunakan.....	100
Tabel 4. 3 Data Hasil <i>Laser Diffraction Analysis</i> Pada Pengujian PSD Fly Ash PT. IPMOMI yang Digunakan dalam Penelitian ini .....	101
Tabel 4. 4 Tipikal Komposisi Kimia pada Sodium Hidroksida Flake 98% (Cristal Company, 2016) .....	102
Tabel 4. 5 Tipikal Komposisi Senyawa Kimia pada Sodium Silikat Pentahidrat (PQ Corporation, 2009) .....	102

Tabel 4. 6 Spesifikasi Agregat Kasar Batu Pecah Pasuruan maks. 10 mm yang Digunakan dalam Penelitian Ini .....	103
Tabel 4. 7 Spesifikasi Agregat Halus Pasir Lumajang yang Digunakan dalam Penelitian Ini .....	104
Tabel 4. 8 Analisa Agregat Gabungan Menggunakan Komposisi 60% Agregat Halus : 40% Agregat Kasar .....	105
Tabel 4. 9 Hasil Waktu Ikut Awal Pasta Masing-Masing Variabel Semen Geopolimer .....	108
Tabel 4. 10 Desain Campuran Pasta Semen Geopolimer Seluruh Variabel .....	109
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Kuat Tekan Pasta Seluruh Variabel Semen Geopolimer .....	109
Tabel 4. 12 Desain Campuran Awal (Dasar) Beton Semen Geopolimer Per m <sup>3</sup> .....	110
Tabel 4. 13 Desain Campuran Awal (Dasar) Terkoreksi (Kadar Air dan Penyerapan Air Oleh Agregat) Beton Semen Geopolimer Per m <sup>3</sup> .....	110
Tabel 4. 14 Nilai Kuat Tekan Beton Semen Geopolimer.....	111
Tabel 4. 15 Hasil Klasifikasi Mutu beton Semen Geopolimer..	111
Tabel 4. 16 Korelasi Umur Pengujian Terhadap Pertumbuhan Nilai Kuat Tekan Beton Semen Geopolimer.....	112
Tabel 4. 17 Hasil Pengujian UPV Pada Beton Semen Geopolimer Variabel Terbaik (V3) .....	113
Tabel 4. 18 Densitas Rata-Rata Beton Semen Geopolimer.....	114
Tabel 4. 19 Analisa Harga Bahan Produksi Semen Geopolimer Variabel Terbaik (V3) dengan Harga Aktivator Skala Retail ...	114
Tabel 4. 20 Analisa Harga Bahan Produksi Beton Semen Geopolimer (GC) dan Perbandinganya dengan Beton Semen Portland (PC) dengan Harga Aktivator Skala Retail.....	115
Tabel 4. 21 Perbandingan Harga Skala Retail dan Skala Komersial (langsung supplier) pada Produk Semen Portland...	115
Tabel 4. 22 Perbandingan Harga Skala Retail dan Skala Komersial (langsung supplier) pada Produk Tambang Batu Kethak .....	116

Tabel 4. 23 Analisa Harga Bahan Produksi Semen Geopolimer Variabel Terbaik (V3) dengan Harga Aktivator Skala Komersial .....116

Tabel 4. 24 Analisa Harga Bahan Produksi Beton Semen Geopolimer (GC) dan Perbandinganya dengan Beton Semen Portland (PC) dengan Harga Aktivator Skala Komersial .....116

Tabel 4. 25 Potensi Keunggulan Beton Semen Geopolimer .....117

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Infrastuktur merupakan indeks nomor 2 yang menentukan suatu tingkat daya saing suatu negara (World Economic Forum, 2016). Dalam membangun suatu infrastruktur tentu material bersifat struktural dipilih sebagai komponen penyusunnya. Beton merupakan salah satu material struktural yang umum digunakan dalam suatu struktur bangunan. Di dalam beton, terdapat bahan pengikat utama yang mampu membentuk kekuatan yaitu semen portland. Melalui reaksi hidrasi, semen portland dapat menjadi pengikat agregat kasar dan halus pada beton (Neville dan Brooks, 2010; Subakti et al, 2012). Hubungan dari beberapa informasi tersebut ialah, negara-negara di seluruh dunia diprediksi akan terus melakukan pembangunan infrastruktur guna memperlancar kegiatan ekonomi di negaranya, yang artinya kebutuhan akan semen portland akan terus meningkat dari tahun ke tahun. Diprediksi pada hingga tahun 2030, kebutuhan dan persediaan semen portland seluruh dunia hanya mampu memenuhi 67,42% kebutuhan. Bahan bersifat semen atau bahan pozzolan menjadi opsi untuk mereduksi kebutuhan semen portland 20-30% dari kebutuhan normal, namun tetap saja hal itu hanya mampu mengubah ke angka pemenuhan 83,29% kebutuhan (Portland Cement Association, 2013).

Disebutkan di atas bahwa bahan pozzolan mampu menjadi material substitusi parsial 20-30% semen portland dikarenakan bahan pozzolan memiliki kandungan Si dan Al yang tinggi sehingga dapat bereaksi dengan sisa hidrasi semen portland yaitu CaO untuk menghasilkan gel C-S-H sekunder sebagai bahan pengikat tambahan (ACI 232R-96). Salah satu jenis bahan pozzolan yang paling banyak tersedia dan dimanfaatkan ialah abu terbang (Fly Ash) dengan jumlah 2260 juta ton per tahun atau 12

kali lipat dari jumlah ketersediaan semen portland (Global Mining Investment Conference, 2010).

Namun disisi lain, terdapat juga penelitian tentang bahan pengikat non semen portland, yaitu teknologi bahan pengikat menggunakan aktivator alkali. Dimana aktivator alkali ini mampu bereaksi dengan material yang mengandung Si dan Al tinggi melalui proses polimerisasi atau saat ini disebut *geopolimer* (Abdullah et al, 2013). Istilah dan penelitian *geopolimer* diciptakan oleh ilmuwan asal Prancis yaitu Prof. Joseph Davidovits pada tahun 1979, hingga akhirnya beliau mendirikan *Institut Géopolymère* yang bermarkas di Prancis yang berdiri hingga saat ini ([www.geopolymer.org](http://www.geopolymer.org)). Namun tidak hanya Davidovits, banyak sekali penelitian tentang geopolimer yang dikembangkan oleh beberapa peneliti di dunia, hingga data menunjukkan bahwa penelitian tentang geopolimer yang awalnya hanya berjumlah dibawah 10 pada tahun 1990 – 2001, kemudian naik ke angka 120 di tahun 2013, dan meningkat signifikan sebesar 400 kata kunci penelitian geopolimer di tahun 2013 ([www.geopolymer.org](http://www.geopolymer.org)). Peningkatan jumlah penelitian tersebut tidak lepas dari semakin banyaknya ajakan untuk melakukan pembangunan berbasis *green building* dan juga teknologi bahan pengikat ini 100% tanpa semen portland. Untuk aplikasi nyata dalam konstruksi bangunan sendiri, bangunan *Queensland University* merupakan aplikasi nyata penggunaan bahan pengikat geopolimer ini. Oleh karena itu, material ini sangat potensial untuk menjadi salah satu solusi apabila binder semen portland mengalami kekurangan persediaan.

Dibidang teknik sipil, beton geopolimer diartikan secara praktis sebagai suatu campuran beton yang terdiri dari pasta geopolimer (sebagai bahan pengikat) dan agregat kasar dan halus sebagai bahan pengisi. Umumnya, pembuatan binder geopolimer menggunakan metode pencampuran basah, yaitu menggabungkan bahan pozzolan dan larutan alkali aktivator dengan komposisi perbandingan molaritas kimia tertentu.

Binder geopolimer merupakan salah satu inovasi dalam menggantikan binder semen portland dikarenakan memiliki beberapa keunggulan, yakni: lebih ramah lingkungan (dalam proses pembuatannya tanpa melepas emisi CO<sub>2</sub> ke atmosfer), tingkat workabilitas yang tinggi (mudah mengalir atau self leveling), lebih tahan terhadap serangan kimia (sulfat, asam, dan klorida), dan lebih tahan terhadap temperatur tinggi (Provis dan Deventer, 2009; Abdullah et al, 2013). Namun dalam aplikasinya di kalangan masyarakat luas, binder geopolimer belum sebanyak binder semen portland masih memiliki kelemahan, yaitu: desain campuran yang melibatkan perhitungan perbandingan bahan kimia (larutan alkali aktivator) dan bahan pozzolan (pemahaman secara scientific masarakat awam masih sangat terbatas dan butuh pengawasan teknisi khusus yang paham tentang geopolimer) (Abdullah et al, 2013). Binder semen portland mudah diterima masyarakat karena untuk menggunakannya sebagai adonan pasta, mortar, maupun beton sangatlah mudah. Tinggal mencampurkan air dengan semen portland dengan rasio air terhadap semen tertentu, maka jadilah adonan pasta, mortar, maupun beton.

Oleh karena itu, penelitian “*Rekayasa Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash*” dengan metode pencampuran kering (semen geopolimer) ini diharapkan dapat menjadi satu solusi untuk menutupi kelemahan binder geopolimer agar dapat lebih mudah diterima dan diaplikasikan oleh masyarakat luas.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berikut merupakan rumusan masalah yang akan diselesaikan melalui penelitian ini, diantaranya:

1. Bagaimana karakteristik material penyusun yang digunakan melalui hasil pengujian XRF, XRD, dan PSD ?
2. Bagaimana mendesain campuran dan hasil performa pengujian kuat tekan dan waktu ikat dari pasta

- geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering ?
3. Bagaimana mendesain campuran dan hasil performa pengujian kuat tekan dan UPV (*Non-destructive test*) dari beton geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering ?
  4. Berapa rincian harga produksi dari semen dan beton geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering ini ?
  5. Apa saja potensi keunggulan dari beton geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering ini ?

### 1.3 Tujuan

Berikut merupakan tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini, diantaranya:

1. Mengetahui karakteristik material penyusun yang digunakan melalui hasil pengujian XRF, XRD, dan PSD.
2. Mengetahui cara mendesain campuran dan menganalisis hasil performa pengujian kuat tekan dan setting time dari pasta geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering.
3. Mengetahui cara mendesain campuran dan menganalisis hasil performa pengujian kuat tekan dan UPV (*Non-destructive test*) dari beton geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering.
4. Mengetahui rincian harga produksi dari semen dan beton geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering ini.
5. Mengetahui potensi keunggulan dari beton geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering ini.



## 1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah, mampu menghasilkan suatu inovasi baru dalam hal teknologi beton ramah lingkungan yaitu beton geopolimer yang lebih aplikatif dan memiliki performa tinggi.

## 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini menggunakan material dengan sumber sebagai berikut:
  - a. Fly Ash: PT. IPMOMI (Paiton unit 7 dan 8)
  - b. NaOH (Sodium hidroksida): PT. Tjiwi Kimia
  - c.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (Sodium Silikat-Pentahidrat): Produk RRT (China)
  - d. Air (Air biasa non Aquades)
2. Pengujian bahan dasar dan produk akhir yang dilaksanakan sebagai berikut :
  - a. Karakterisasi material: XRF, XRD, PSD
  - b. Pasta: Waktu ikat (Setting Time) dan Kuat Tekan
  - c. Beton: Kuat Tekan dan UPV

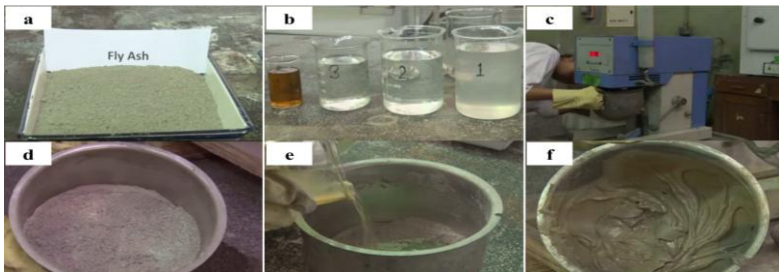
“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Definisi dan Perbedaan Bahan Pengikat Geopolimer Metode Pencampuran Kering dan Basah

#### 2.1.1 Definisi

Metode pencampuran basah merupakan metode yang umum digunakan dalam proses pembuatan beton geopolimer. Maksudnya ialah, bahan kimia alkali aktivator yang digunakan disajikan sendiri dalam bentuk larutan. Padatan NaOH (Natrium Hidroksida) dilarutkan sesuai konsentrasi molar yang diinginkan dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (Natrium Silikat) berwujud larutan atau biasa disebut *water glass*. larutan tersebut kemudian dicampur dengan bahan pozzolan yang disiapkan dalam wadah tersendiri sebelumnya (Abdullah et al, 2013).



**Gambar 2. 1** Serangkaian proses pembuatan geopolimer metode pencampuran basah (CSIR-NML, 2016)

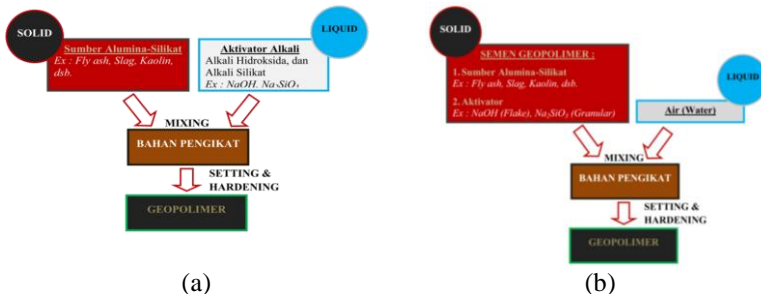
Metode pencampuran kering merupakan metode dimana bahan kimia alkali aktivator digiling bersamaan dengan bahan pozzolan dengan komposisi tertentu, sehingga menghasilkan suatu butiran halus mirip semen (semen geopolimer). Semen geopolimer ini cukup ditambahkan air saja dalam aplikasi penggunaannya (Tri Eddy, 2016).



**Gambar 2. 2** Serangkaian proses pembuatan geopolimer metode pencampuran kering (Tri Eddy, 2016)

### 2.1.2 Perbedaan

Untuk lebih mudah dalam memahami perbedaan metode pencampuran basah dan kering dalam proses penyajian suatu binder geopolimer, berikut pada (Gambar 2.3) dan (Tabel 2.1):



**Gambar 2. 3** Diagram alir penyajian binder geopolimer: metode pencampuran basah (a) [Yun Ming et al, 2016] , metode pencampuran kering (b) [Tri Eddy, 2016]

**Tabel 2. 1** Perbedaan proses penyajian binder geopolimer dengan metode basah dan kering

Metode pencampuran basah	Metode pencampuran kering
1. Proses pencampuran semua bahan dilakukan secara serentak pada saat itu juga, baik bahan pengikat maupun	1. Proses dalam menghasilkan bahan pengikat (semen geopolimer) dilakukan di tempat lain (industri) sebelum

<b>Metode pencampuran basah</b> bahan pengisi.	<b>Metode pencampuran kering</b> pencampuran dilakukan
2. Ketentuan desain campuran harus mengetahui karakteristik masing masing material (Seperti pengujian XRF untuk bahan pozzolan) dan komposisi kimia untuk bahan alkali aktivator untuk menghitung perbandingan komposisi yang optimum berdasarkan rasio molaritas yang telah disarankan pada penelitian sebelumnya.	2. Ketentuan desain campuran berdasarkan rasio air terhadap semen geopolimer ( <i>w/c ratio</i> ).

*Sumber: Abdullah et al, 2013; Tri Eddy, 2016*

## **2.2 Material Penyusun**

### **2.2.1 Sodium Hidroksida (NaOH)**

NaOH merupakan salah satu jenis alkali hidroksida yang digunakan dalam suatu bahan pengikat geopolimer. Selain NaOH terdapat Kalsium Hidroksida (KOH). Namun, NaOH lebih banyak dipilih karena lebih murah harga nya. Natrium hidroksida biasa dikomersilkan dalam bentuk flake (padat) dengan tingkat asai 97-99% (Criado; Jimenez dan Palomo, 2010).

Material tersebut sangat bersifat higroskopis, apabila NaOH dibiarkan terbuka dan terkontak langsung dengan udara, maka NaOH akan menyerap air yang terkandung di udara dan membuatnya seperti meleleh (Caustic Soda, JSIA, 2006).

Dalam penggunaannya sebagai material penyusun bahan pengikat geopolimer, kebanyakan disiapkan secara tertutup, lalu ditimbang, dan segera dikonsentrasikan menjadi suatu larutan sesuai molar yang didesain, dan di tempatkan disuatu botol tertutup. Hal tersebut disebabkan oleh tidak stabilnya massa

NaOH karena sifat higroskopisnya jika tidak segera di larutkan (Standarization of sodium silicate-Macalester, 2004).



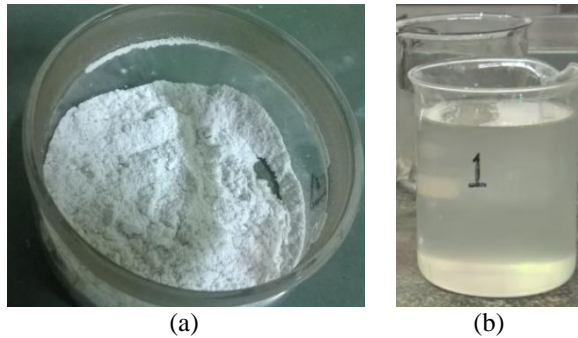
**Gambar 2. 4** NaOH dalam wujud flake (a) [Dok. Pribadi, 2016]; NaOH dalam wujud larutan dengan konsentrasi tertentu (b) [CSIR-NML, 2016]

### 2.2.2 Sodium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

$\text{Na}_2\text{SiO}_3$  biasanya dikomersilkan dalam wujud cair atau larutan atau biasa disebut *Water glass*. Alkali Silikat harus dikombinasikan dengan alkali hidroksida, dikarenakan sifat reaksinya yang perlahan, sehingga kekuatan bahan pengikat geopolimer menjadi lebih rendah (Criado et al, 2010; palomo et al 1999). Begitu juga sebaliknya, apabila larutan hidroksida saja yang digunakan, maka mutu yang dicapai lebih rendah jika dibandingkan dengan kombinasi keduanya yang dapat mencapai mutu kuat tekan 40 – 90 MPa (Nez dan Palomo, 2003; Fernandez, Jimenez dan Palomo, 2005). Tujuan penambahan sodium silikat adalah meningkatkan pembentukkan proses geopolimerisasi.

Material tersebut juga bersifat higroskopis, namun masih lebih sensitif NaOH (Metso Sodium Metasilicate- PQ Corporation, 2009). Oleh karena itu kebanyakan dipakai dalam bentuk liquid yang dikenal dengan *water glass*.

Selain itu, terdapat pendapat bahwa penggunaan alkali silikat dalam wujud padat akan mengurangi kekuatan pada bahan pengikat geopolimer dibanding menggunakan alkali dalam bentuk larutan (S-D Wang, Scrivener dan Pratt, 1994).



**Gambar 2. 5**  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam wujud granular (a) [Dok. Pribadi, 2016];  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam wujud larutan atau disebut *water glass* (b) [CSIR-NML, 2016]

### 2.2.3 Fly Ash

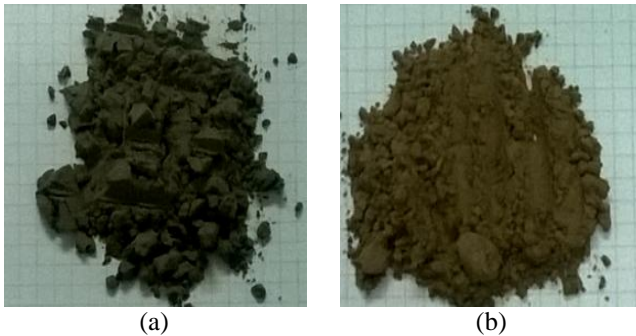
Fly Ash merupakan salah satu bahan pozzolan yang berasal dari pembakaran batubara pada pembangkit listrik tenaga uap yang terbang melekat pada sisi-sisi cerobong asap. Dikategorikan sebagai bahan pozzolan karena memiliki kandungan oksida: Silika dan Alumina yang kadarnya dominan lebih tinggi dari oksida lainnya. Dengan volume ketersediaan 2260 juta ton per tahun, maka Fly Ash berpotensi sebagai bahan pozzolan yang paling aplikatif untuk digunakan (Global Mining Investment Conference, 2010; Abdullah et al 2013)

Fly Ash digolongkan menjadi dua katagori, yaitu: *Low Calcium Fly Ash* ( $\text{CaO} < 10\%$ ) dan *High Calcium Fly Ash* ( $\text{CaO} > 10\%$ ). Dalam geopolimer, penggunaan *Low Calcium Fly Ash* memiliki waktu setting time 6 (enam) kali lebih lambat daripada *High Calcium Fly Ash*. Hal ini disebabkan *High Calcium Fly Ash* memiliki sifat sebagai pozzolan sekaligus bahan bersifat semen (*cementitious*), sedangkan *Low Calcium Fly Ash* hanya memiliki sifat pozzolan saja (ASTM C618-12). *High Calcium Fly Ash* yang memiliki kandungan  $\text{CaO} > 15\%$  dapat mereduksi kebutuhan semen portland hingga 40%. Nilai tersebut lebih

besar daripada *Low Calcium Fly Ash* yang hanya mampu mereduksi 20-30% (Wei et al, 1992).

**Tabel 2. 2** Persyaratan Kimia Fly Ash (ASTM C618-12)

	Fly Ash Tipe F (Low Calcium Fly Ash)	Fly Ash Tipe C (High Calcium Fly Ash)
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , minimal, %	70,0	50,0
SO <sub>3</sub> , Maksimal, %	5,0	5,0
Kadar Air, Maksimal, %	3,0	3,0
Hilang Pijar / LOI, Maksimal, %	6,0	6,0



**Gambar 2. 6** Low Calcium Fly Ash (a); High Calcium Fly Ash (b)

*Low Calcium Fly Ash* biasanya dihasilkan dari proses pembakaran *Anthracite* atau *Bituminous Coal*, akan tetapi juga dihasilkan dari *subbituminous coal* dan *lignite*. *High Calcium Fly Ash* biasanya dihasilkan dari proses pembakaran *lignite* atau *subbituminous coal* (ASTM C618-12).



	<----- Low Rank ----->		----- High Rank ----->	
Rank:	Lignite	Subbituminous	Bituminous	Anthracite
Age:	----- increases ----->			
% Carbon:	65-72	72-76	76-90	90-95
% Hydrogen:	~5 ----- decreases ----- ~2			
% Nitrogen:	<----- ~1-2 ----->			
% Oxygen:	~30 ----- decreases ----- ~1			
% Sulfur:	~0 ----- increases ----- ~4 --- decreases --- ~0			
% Water:	70-30	30-10	10-5	~5
Heating value (BTU/lb):	~7000	~10,000	12,000–15,000	~15,000

**Gambar 2. 7** Sifat masing-masing jenis batu bara dan kelas nya (<http://www.ems.psu.edu/~radovic/Chapter7.pdf>)



**Gambar 2. 8** *Coal Rank*, dari kiri: Lignite, Sub-bituminous, Bituminous, dan Anthracite

### 2.3 Parameter yang diperlukan dalam membuat desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering

Dalam pembuatan desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering, terdapat beberapa parameter yang harus diperhatikan (Tri Eddy, 2016). Parameter dan perhitungannya dijelaskan sebagai berikut:

### 2.3.1 Perbandingan Fly Ash terhadap padatan aktivator

Jika dalam bahan pengikat geopolimer metode pencampuran basah perbandingan yang digunakan ialah Fly Ash terhadap larutan aktivator, maka di metode pencampuran kering tentu membutuhkan perbandingan berat material dalam wujud padat, yaitu perbandingan Fly Ash dan padatan aktivator. Oleh karena itu diperlukan konversi dari metode pencampuran basah ke metode pencampuran kering. Berikut ialah langkah-langkahnya:

1. Menyajikan desain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran basah.

Berikut disajikan dalam bentuk notasi, karena desain campuran dari beberapa penelitain berbeda-beda.

**Tabel 2. 3** Notasi pada masing-masing material geopolimer metode pencampuran basah

<b>Material</b>	<b>Notasi</b>
Fly Ash	$W_f$
Larutan NaOH	$W_{lh}$
Larutan $Na_2SiO_3$	$W_{ls}$

2. Menyajikan tabel spesifikasi dari larutan aktivator yang digunakan

**Tabel 2. 4** Perbandingan berat NaOH padat dan Air dalam beberapa konsentrasi molar larutan NaOH

<b>Molaritas</b>	<b>Padatan (gr)</b>	<b>Air (gr)</b>	<b>Padatan/Larutan</b>	<b>Padatan/Air</b>
16	444	556	44%	80%
14	404	596	40%	68%
12	361	639	36%	56%
10	314	686	31%	46%
8	262	738	26%	36%

Berikut untuk komposisi kimia larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  disajikan dalam bentuk notasi, karena komposisi kimia dari beberapa produk berbeda-beda.

**Tabel 2. 5** Notasi dari prosentase kandungan oksida dalam larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

Oksida	Notasi
$\text{SiO}_2$	$\% \text{SiO}_2$
$\text{Na}_2\text{O}$	$\% \text{Na}_2\text{O}$
Air ( $\text{H}_2\text{O}$ )	$\% \text{H}_2\text{O}$

3. Menghitung massa padat dari aktivator dan prosentase perbandingan Fly Ash terhadap padatan aktivator

- Menghitung NaOH dalam wujud padat ( $W_{ph}$ ), dengan (Persamaan 2.1), yaitu:

$$\text{NaOH}_{\text{padat}}(W_{ph}) = W_{lh} \times \text{Rasio padatan} / \text{larutan} \quad (2.1)$$

$W_{lh}$  dapat dilihat pada (Tabel 2.3)

Rasio padatan terhadap larutan, dapat dilihat pada (Tabel 2.4).

- Menghitung  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam wujud padat ( $W_{ps}$ ), dengan (Persamaan 2.2), yaitu:

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3_{\text{padat}}(W_{ps}) = W_{ls} \times (100\% - \% \text{H}_2\text{O}) \quad (2.2)$$

$W_{lh}$  dapat dilihat pada (Tabel 2.3)

$\% \text{H}_2\text{O}$ , dapat dilihat pada (Tabel 2.5)

- Menghitung % Fly Ash dalam suatu campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering, dengan (Persamaan 2.3), yaitu:

$$\% \text{Fly Ash} = \frac{W_f}{(W_f + W_{ph} + W_{ps})} \times 100\% \quad (2.3)$$

- Menghitung % aktivator padat dalam suatu campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering, dengan (Persamaan 2.4), yaitu:

$$\% \text{Aktivator padat} = \frac{W_{ph} + W_{ps}}{(W_f + W_{ph} + W_{ps})} \times 100\% \quad (2.4)$$

### 2.3.2 Perbandingan Padatan NaOH terhadap Padatan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

Untuk perbandingan NaOH terhadap  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam wujud padat, dihitung dengan (Persamaan 2.5) dan (Persamaan 2.6) berikut:

- Menghitung %NaOH padat dalam suatu kesatuan aktivator padat

$$\% \text{NaOH} = \frac{W_{ph}}{(W_{ph} + W_{ps})} \times 100\% \quad (2.5)$$

- Menghitung %NaOH padat dalam suatu kesatuan aktivator padat

$$\% \text{Na}_2\text{SiO}_3 = \frac{W_{ps}}{(W_{ph} + W_{ps})} \times 100\% \quad (2.6)$$

### 2.3.3 Perbandingan Air terhadap Semen Geopolimer (Rasio W/C)

Seperti halnya bahan pengikat semen portland, maka bahan pengikat geopolimer dengan metode pencampuran kering (semen geopolimer) pun membutuhkan satu parameter penting yaitu rasio air terhadap semen (bahan pengikat) yang dihitung dengan persamaan berikut :

- Menghitung massa air dalam suatu larutan NaOH ( $W_{wh}$ ), dengan (Persamaan 2.7), yaitu:

$$\text{Air dalam larutan NaOH } (W_{wh}) = W_{lh} - W_{ph} \quad (2.7)$$

- Menghitung massa air dalam suatu larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $W_{ws}$ ), dengan (Persamaan 2.8), yaitu:

$$\text{Air dalam larutan } \text{Na}_2\text{SiO}_3 \text{ } (W_{ws}) = W_{ls} - W_{ps} \quad (2.8)$$

- Menghitung massa air total ( $W_{wtot}$ ) dalam suatu larutan aktivator NaOH dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . dengan (Persamaan 2.9), yaitu:

$$\text{Air total dalam larutan aktivator } (W_{wtot}) = W_{wh} + W_{ws} \quad (2.9)$$

- Menghitung rasio air terhadap semen atau bahan pengikat padat (W/C Ratio), dengan (Persamaan 2.10), yaitu:

$$W/C \text{ Ratio} = \frac{W_{wtot}}{(W_f + W_{ph} + W_{ps})} \quad (2.10)$$

### **2.3.4 Merangkum parameter dalam desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering**

Akhir dari runtutan perhitungan tersebut adalah menghasilkan beberapa parameter (batasan atau kisaran) dalam mendesain campuran bahan pengikat metode pencampuran kering sesuai dengan literatur geopolimer berbasis Fly Ash yang menghasilkan performa yang optimum.

Berikut pada (Tabel 2.6) merupakan parameter dalam mendesain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering:

**Tabel 2. 6** Parameter Desain Campuran Bahan Pengikat Geopolimer Berbasis Fly Ash dengan Metode Pencampuran Kering

No.	Parameter	Nilai diperoleh dari
1	Perbandingan Fly Ash terhadap Padatan Aktivator (FA : Aktivator <sub>padat</sub> )	Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4
2	Perbandingan NaOH terhadap Padatan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (NaOH <sub>padat</sub> : Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> <sub>padat</sub> )	Persamaan 2.5 dan Persamaan 2.6
3	Rasio air terhadap semen geopolimer (W/C Ratio)	Persamaan 2.10

#### **2.4 Penelitian sebelumnya beton geopolimer berbasis Fly Ash metode pencampuran basah dan analisisnya untuk metode pencampuran kering**

Dalam penelitian ini, penulis mengumpulkan beberapa literatur yang berhubungan dengan beton geopolimer yang berbahan dasar Fly Ash dengan metode pencampuran basah. Literatur tersebut diantaranya:

1. *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, (Hardjito, 2005)
2. *Modifed Guidelines For Geopolymer Concrete (Fly Ash-Based Geopolymer) Mix Design Using Indian Standard*, (Anuradha et al, 2011)

## 2.4.1 *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, (Hardjito, 2005)*

### 2.4.1.1 *Material yang digunakan*

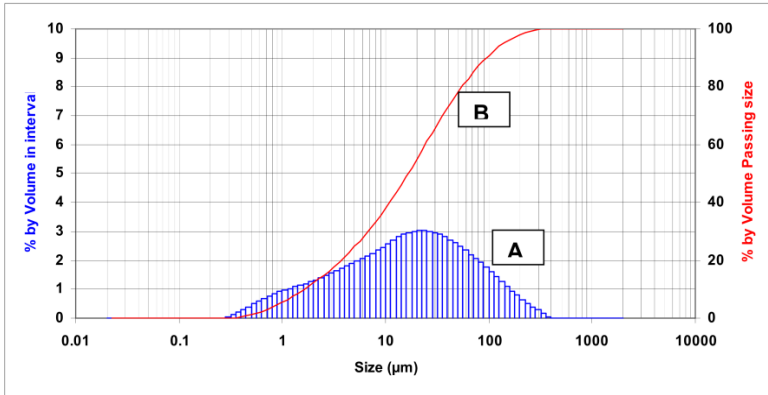
#### A. Fly Ash

Fly Ash yang digunakan berasal dari *Colie Power Stasion* di Australia. Diambil 3 sampel material, yaitu: batch 1 (diperoleh pada pertengahan tahun 2001), batch 2 (diperoleh pada pertengahan tahun 2003), dan batch 3 (diperoleh pada pertengahan tahun 2004). Berikut merupakan hasil pengujian XRF dan PSD Fly Ash tersebut:

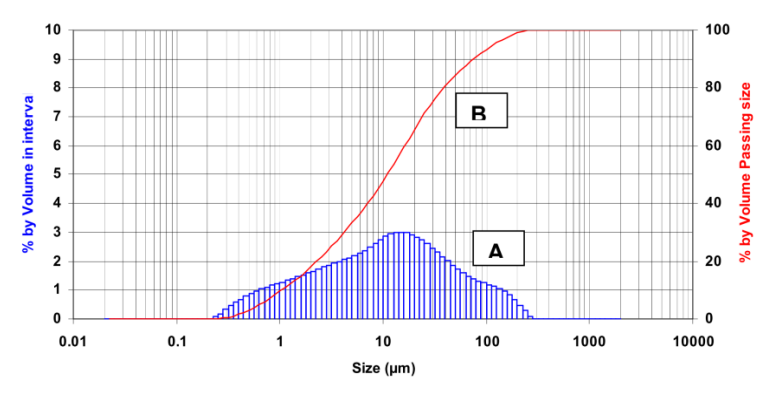
**Tabel 2. 7** Komposisi Fly Ash berdasarkan hasil perngujian XRF (Hardjito, 2005)

Oksida	Batch 1	Batch 2	Batch 3
SiO <sub>2</sub>	53,36	47,80	48,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,49	24,40	29,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,86	17,40	12,70
CaO	1,34	2,42	1,78
Na <sub>2</sub> O	0,37	0,31	0,39
K <sub>2</sub> O	0,80	0,55	0,55
TiO <sub>2</sub>	1,47	1,328	1,67
MgO	0,77	1,19	0,89
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,43	2,00	1,69
SO <sub>3</sub>	1,70	0,29	0,50
ZrO <sub>2</sub>	-	-	0,06
Cr	-	0,01	0,016
MnO	-	0,12	0,06
LOI	1.39	1.10	1.61

Dari ketiga jenis Fly Ash yang digunakan, melalui tes XRF, maka semuanya masuk dalam katagori *Low Calcium Fly Ash* sesuai dengan ASTM C618-12.

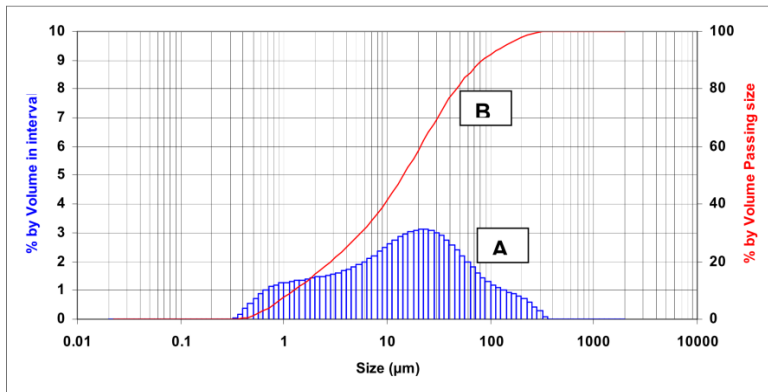


**Gambar 2. 9** PSD Fly Ash Batch 1 (Hardjito, 2005)



**Gambar 2. 10** PSD Fly Ash Batch 2 (Hardjito, 2005)





**Gambar 2. 11** PSD Fly Ash Batch 2 (Hardjito, 2005)

Dari ketiga diagram PSD diatas, untuk lebih dapat mengetahui ukuran partikel dan luas permukaan Fly Ash, berikut detailnya disajikan pada (Tabel 2.8):

**Tabel 2. 8** Hasil tes PSD (*Particle Size Distribution*) Fly Ash (Hardjito, 2005)

	<b>Batch 1</b>	<b>Batch 2</b>	<b>Batch 3</b>
Particle size ( $\mu\text{m}$ ), 80% Partikel	55	39	46
Spesific Surface Area ( $\text{m}^2/\text{cc}$ )	1,29	1,94	1,52

## B. NaOH

NaOH (Sodium Hidroksida) yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *Sigma-Aldrich Pty Ltd*, di Australia. Menggunakan kelas teknis dengan kemurnian 98%. NaOH disiapkan dengan melarutkannya di dalam air, massa NaOH padat dalam sebuah larutan bervariasi tergantung pada konsentrasi molar larutan seperti pada (Tabel 2.9) berikut:

**Tabel 2. 9.** Variasi molar dalam suatu larutan NaOH (Hardjito, 2005)

<b>Molaritas</b>	<b>Padatan (gr)</b>	<b>Air (gr)</b>	<b>Padatan/ Larutan</b>	<b>Padatan/ Air</b>
16	444	556	44%	80%
14	404	596	40%	68%
12	361	639	36%	56%
10	314	686	31%	46%
8	262	738	26%	36%

### C. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

Larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Sodium Silikat) menggunakan merk Vitrosol D-A53 berasal dari PQ Australia. Berikut merupakan komposisi kimia dari Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yang digunakan :

**Tabel 2. 10** Komposisi kimia larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Hardjito, 2005)

<b>Oksida</b>	<b>%</b>
SiO <sub>2</sub>	29,4
Na <sub>2</sub> O	14,7
Air (H <sub>2</sub> O)	55,9

#### 2.4.1.2 *Parameter, Desain campuran, Dan performa Optimum yang dihasilkan*

Hal-hal yang menjadi parameter desain campuran pada penelitian Hardjito, 2005 pada Campuran 2 dan 4, yaitu:

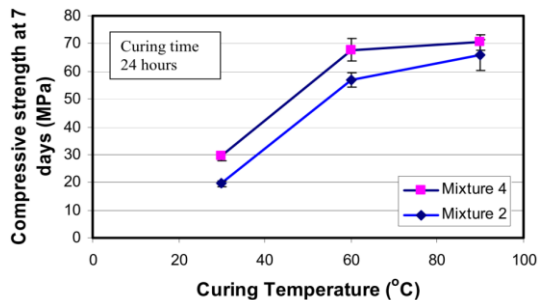
**Tabel 2. 11** Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran basah untuk campuran 2 dan 4 (Hardjito, 2005)

No.	Parameter	Nilai
1	Rasio larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ terhadap NaOH	2,5
2	Molaritas NaOH	8 dan 14 M
3	Rasio larutan alkali aktivator terhadap Fly Ash	0,35

Berikut merupakan beberapa desain campuran yang paling optimum dari penelitian ini, dan berikut analisisnya:

**Tabel 2. 12** Desain campuran 2 dan 4 geopolimer berbasis Fly Ash (Hardjito, 2005)

Campuran	Fly Ash (Kg)	Larutan NaOH (Kg)	Larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (Kg)
2	476	48 (8M)	120
4	476	48 (14M)	120



**Gambar 2. 12** Hasil pengujian kuat tekan beton campuran 2 dan 4 pada umur 7 hari dengan temperature curing 30°C, 60°C, dan 90°C

**Tabel 2. 13** Detail hasil pengujian kuat tekan pada campuran 2 dan 4 (Hardjito, 2005)

Campuran	Molaritas	Kuat tekan (MPa)		
		30°C	60°C	90°C
2	8	20	58	65
4	14	30	68	70

Dari tabel dan grafik diatas, dapat disimpulkan bahwa molaritas NaOH pada suatu campuran beton geopolimer mempengaruhi nilai kuat tekan. Semakin tinggi molaritas, maka kuat tekan yang dihasilkan juga tinggi.

#### 2.4.1.3 Konversi desain campuran dan parameter desain campuran menuju metode pencampuran kering

Setelah mengetahui informasi tentang parameter, desain campuran, dan hasil performa bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran basah dalam penelitian Hardjito, 2005; maka selanjutnya akan dianalisa untuk konversinya ke metode pencampuran kering yang langkah-langkah perhitunganya seperti pada (Sub-Bab 2.3). Berikut Uraianya:

### I. Perbandingan Fly Ash terhadap padatan aktivator

1. Menyajikan desain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran basah.

**Tabel 2. 14** Massa material geopolimer berbasis Fly-Ash metode pencampuran basah Campuran-2 (Hardjito, 2005)

Material	Massa (Kg)
Fly Ash	476
Larutan NaOH	48 (8Molar)
Larutan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	120

2. Menyajikan tabel spesifikasi dari larutan aktivator yang digunakan dalam penelitian Hardjito, 2005

**Tabel 2. 15** Perbandingan berat NaOH padat dan Air dalam beberapa konsentrasi molar larutan NaOH (Hardjito, 2005)

Molaritas	Padatan (gr)	Air (gr)	Padatan/Larutan	Padatan/Air
16	444	556	44%	80%
14	404	596	40%	68%
12	361	639	36%	56%
10	314	686	31%	46%
8	262	738	26%	36%

Berikut untuk komposisi kimia larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang digunakan dalam penelitian Hardjito, 2005:

**Tabel 2. 16** % kandungan oksida dalam larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (Hardjito, 2005)

Oksida	Kadari (%)
$\text{SiO}_2$	29,4
$\text{Na}_2\text{O}$	14,7
Air ( $\text{H}_2\text{O}$ )	55,9

3. Menghitung massa padat dari aktivator dan prosentase perbandingan Fly Ash terhadap padatan aktivator

- Menghitung NaOH dalam wujud padat ( $W_{\text{ph}}$ ), dengan (Persamaan 2.1).

$$\text{NaOH}_{\text{padat}}(W_{\text{ph}}) = 48 \times 26\% = 12,576 \text{ Kg}$$

- Menghitung  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam wujud padat ( $W_{\text{ps}}$ ), dengan (Persamaan 2.2).

$$\text{Na}_2\text{SiO}_{3\text{padat}}(W_{\text{ps}}) = 120 \times (100\% - 55,9\%) = 52,92 \text{ Kg}$$

- Menghitung % Fly Ash dalam suatu campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering, dengan (Persamaan 2.3).

$$\% \text{Fly Ash} = \frac{476}{(476+12,675+52,92)} \times 100\% = 88\%$$

- Menghitung % aktivator padat dalam suatu campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering, dengan (Persamaan 2.4).

$$\% \text{Aktivator padat} = \frac{12,675+52,92}{(476+12,675+52,92)} \times 100\% = 12\%$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh perbandingan Fly Ash terhadap bahan alkali aktivator dalam wujud padat ialah:

$$\mathbf{88\% \text{ FA} : 12\% \text{ Aktivator}_{\text{padat}}}$$

## II. Perbandingan Padatan NaOH terhadap Padatan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

Untuk perbandingan NaOH terhadap  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam wujud padat, dihitung dengan (Persamaan 2.5) dan (Persamaan 2.6).

- Menghitung %NaOH padat dalam suatu kesatuan aktivator padat

$$\% \text{NaOH}_{\text{padat}} = \frac{12,576}{(12,576 + 52,92)} \times 100\% = 19\%$$

- Menghitung %Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> padat dalam suatu kesatuan aktivator padat

$$\%Na_2SiO_3_{\text{padat}} = \frac{52,92}{(12,576 + 52,92)} \times 100\% = 81\%$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh perbandingan bahan alkali aktivator NaOH<sub>padat</sub> terhadap Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> padat ialah:

$$\begin{aligned} 19\% \text{ NaOH}_{\text{padat}} &: 81\% \text{ Na}_2\text{SiO}_3_{\text{padat}} \\ &\text{atau,} \\ 1 \text{ NaOH}_{\text{padat}} &: 4.21 \text{ Na}_2\text{SiO}_3_{\text{padat}} \end{aligned}$$

### III. Rasio Air Terhadap Bahan Pengikat s

Seperti hal nya bahan pengikat semen portland, maka bahan pengikat geopolimer dengan metode pencampuran kering (semen geopolimer) pun membutuhkan satu parameter penting yaitu rasio air terhadap semen (bahan pengikat) yang dihitung dengan persamaan berikut :

- Menghitung massa air dalam suatu larutan NaOH ( $W_{\text{wh}}$ ), dengan (Persamaan 2.7).

$$\text{Air dalam larutan NaOH } (W_{\text{wh}}) = 48 - 12,576 = 35,424 \text{ Kg}$$

- Menghitung massa air dalam suatu larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ( $W_{\text{ws}}$ ), dengan (Persamaan 2.8).

$$\text{Air dalam larutan Na}_2\text{SiO}_3 (W_{\text{ws}}) = 120 - 52,92 = 67,08 \text{ Kg}$$

- Menghitung massa air total ( $W_{\text{wtot}}$ ) dalam suatu larutan aktivator NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dengan (Persamaan 2.9).

$$\text{Air total dalam larutan aktivator } (W_{\text{wtot}}) = 35,424 + 67,08 = 102,50 \text{ Kg}$$

- Menghitung rasio air terhadap semen atau bahan pengikat padat (W/C Ratio), dengan (Persamaan 2.10).

$$W/C \text{ Ratio} = \frac{102,50}{(476+12,576+52,92)} = 0,19$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh rasio air terhadap semen (bahan pengikat) atau W/C Ratio = **0,19**

#### **IV. Parameter dalam desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering**

Berikut pada (Tabel 2.17) merupakan perbandingan massa pada desain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran basah dan metode pencampuran kering dari hasil konversi perhitungan pada campuran 2 penelitian Hardjito, 2005:

**Tabel 2. 17** Perbandingan nilai massa pada desain campuran bahan pengikat geopolimer metode basah dan kering pada Campuran 2

<b>Metode Basah</b>		<b>Metode Kering</b>	
<b>Material</b>	<b>Nilai (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Material</b>	<b>Nilai (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
Fly Ash	476	Fly Ash	476
Larutan NaOH	48 (8 Molar)	Padatan NaOH	12,576
Larutan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	120	Padatan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	52,92
Air	-	Air	102.50 (W/C = 0,19)

Dihitung dengan langkah-langkah yang sama, maka berikut pada (Tabel 2.18) merupakan hasil konversi perhitungan pada campuran 4 penelitian Hardjito, 2005:



**Tabel 2. 18** Perbandingan nilai massa pada desain campuran bahan pengikat geopolimer metode basah dan kering pada Campuran 4

Metode Basah		Metode Kering	
Material	Nilai (Kg/m <sup>3</sup> )	Material	Nilai (Kg/m <sup>3</sup> )
Fly Ash	476	Fly Ash	476
Larutan NaOH	48 (14 Molar)	Padatan NaOH	19,392
Larutan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	120	Padatan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	52,92
Air	-	Air	95,69 (W/C = 0,17)

Berikut pada (Tabel 2.19) merupakan parameter dalam mendesain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering, jika nantinya mengacu pada Campuran 2 dan Campuran 4 pada penelitain Hardjito, 2005:

**Tabel 2. 19** Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering Campuran 2

No.	Parameter	Nilai Campuran 2	Nilai Campuran 4
1	Perbandingan Fly Ash terhadap Padatan Aktivator (FA : Aktivator <sub>padat</sub> )	88% : 12%	87% : 13%
2	Perbandingan NaOH terhadap Padatan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (NaOH <sub>padat</sub> : Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> <sub>padat</sub> )	1 : 4,21	1 : 2,73
3	Rasio air terhadap semen geopolimer (W/C Ratio)	0,19	0,17

Sebagai pembandingan, parameter metode pencampuran basah dapat dilihat pada (Tabel 2.11).

## 2.4.2 *Modified Guidelines for Geopolymer Concrete (Fly Ash-Based Geopolymer) Mix Design Using Indian Standard, (Anuradha et al, 2011)*

### 2.4.2.1 *Material yang digunakan*

#### A. Fly Ash

Fly Ash yang digunakan berasal dari *Colie Power Stasion* di Australia. Fly Ash yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi yang sama dengan penelitian yang dilakukan Hardjito pada tahun 2005. Untuk spesifikasinya dapat dilihat pada (Tabel 2.3 dan 2.4) dan (Gambar 2.9; 2.10 dan 2.11).

#### B. NaOH

NaOH (Sodium Hidroksida) yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan kelas teknis dengan kemurnian 94-96%. NaOH disiapkan dengan melarutkannya di dalam air, massa NaOH padat dalam sebuah larutan bervariasi tergantung pada konsentrasi molar larutan seperti pada (Tabel 2.5).

#### C. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

Larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Sodium Silikat) yang digunakan memiliki komposisi kimia sebagai berikut:

**Tabel 2. 20** Komposisi kimia larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Anuradha et al, 2011)

Oksida	%
SiO <sub>2</sub>	31.4
Na <sub>2</sub> O	159
Air (H <sub>2</sub> O)	52.7

### 2.4.2.2 Desain campuran dan performa yang dihasilkan

Hal-hal yang menjadi parameter desain campuran pada penelitian Anuradha et al, 2011; yaitu:

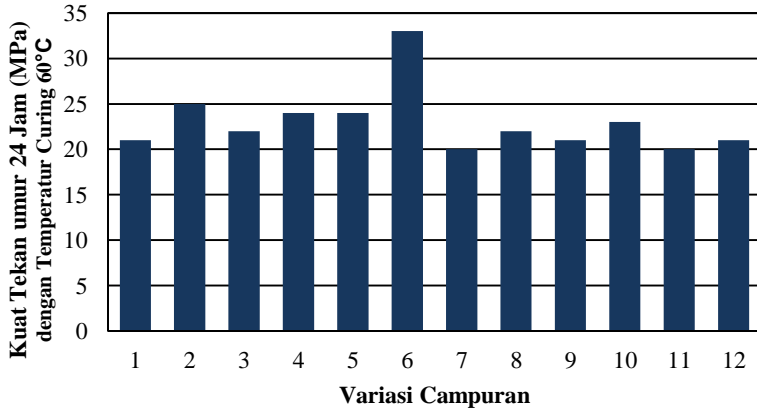
**Tabel 2. 21** Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran basah untuk campuran 1 hingga 12 (Anuradha et al, 2011)

No.	Parameter	Nilai
1	Rasio larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ terhadap NaOH	2,5 – 3,5
2	Molaritas NaOH	16M
3	Rasio larutan alkali aktivator terhadap Fly Ash	0,375 – 0,796

Berikut merupakan beberapa desain campuran yang paling optimum dari penelitian ini, dan berikut analisisnya:

**Tabel 2. 22** Desain campuran 1 – 12 beton geopolimer berbasis Fly Ash (Anuradha, 2011)

Camp.	Fly Ash (Kg)	Larutan NaOH 16M (Kg)	Larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (Kg)	Lar. Alkali Aktivator : Fly Ash	NaOH : $\text{Na}_2\text{SiO}_3$
1	364,9	52,7	184,5	0,65	3,5
2	419,7	68,5	171,1	0,57	2,5
3	482,6	68,5	171,1	0,50	2,5
4	555,0	68,5	171,1	0,43	2,5
5	638,2	68,5	171,1	0,38	2,5
6	483,7	89,8	224,6	0,65	2,5
7	554,7	103,0	257,5	0,65	2,5
8	483,7	82,2	205,5	0,59	2,5
9	554,7	89,8	224,6	0,57	2,5
10	554,7	82,2	205,5	0,52	2,5
11	364,9	83,0	207,3	0,80	2,5
12	447,0	89,8	224,6	0,70	2,5



**Gambar 2. 13** Hasil pengujian kuat tekan dari masing-masing variasi campuran beton geopolimer berbasis Fly Ash (Anuradha et al, 2011)

**Tabel 2. 23** Detail hasil pengujian kuat tekan pada masing-masing variasi campuran beton geopolimer berbasis Fly Ash (Anuradha et al, 2011)

Campuran	Kuat Tekan (MPa)
1	21
2	25
3	22
4	24
5	24
6	33
7	20
8	22
9	21
10	23
11	20
12	21

Dari tabel dan grafik diatas, dapat disimpulkan bahwa:

- a. Perbandingan NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yang optimum berada pada nilai 2,5. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan nilai perbandingan 3,5 pada campuran 1 menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih rendah daripada nilai perbandingan 2,5 pada campuran 6.
- b. Perbandingan larutan alkali aktivator : Fly Ash yang optimum nilainya tidak lebih dari 0,65. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan nilai perbandingan 0,7 pada campuran 12 dan 0,8 pada campuran 11 menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih rendah daripada nilai perbandingan 0,38 hingga 0,65 pada campuran 2,3,4,5,6, 8,9, dan 10.

#### 2.4.2.3 Konversi desain campuran dan parameter desain campuran menuju metode pencampuran kering

Setelah mengetahui informasi tentang parameter, desain campuran, dan hasil performa bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran basah dalam penelitian Anuradha et al, 2011; maka selanjutnya akan dianalisa untuk konversinya ke metode pencampuran kering yang langkah-langkah perhitunganya seperti pada (Sub-Bab 2.3). Berikut uraiannya:

### I. Perbandingan Fly Ash terhadap padatan aktivator

Menyajikan desain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran basah.

**Tabel 2. 24** Massa masing-masing material geopolimer berbasis Fly-Ash metode pencampuran basah Campuran-1 (Anuradha et al, 2011)

Material	Nilai
Fly Ash	364,9
Larutan NaOH	52,7 (16Molar)
Larutan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	184,5

- Menyajikan tabel spesifikasi dari larutan aktivator yang digunakan dalam penelitian Anuradha et al, 2011

**Tabel 2. 25** Perbandingan berat NaOH padat dan Air dalam beberapa konsentrasi molar larutan NaOH (Anuradha et al, 20011)

Molaritas	Padatan (gr)	Air (gr)	Padatan/Larutan	Padatan/Air
16	444	556	44%	80%
14	404	596	40%	68%
12	361	639	36%	56%
10	314	686	31%	46%
8	262	738	26%	36%

Berikut untuk komposisi kimia larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang digunakan dalam penelitian Anuradha et al, 2011:

**Tabel 2. 26** % kandungan oksida dalam larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (Anuradha et al, 2011)

Oksida	Nilai (%)
$\text{SiO}_2$	31,4
$\text{Na}_2\text{O}$	15,9
Air ( $\text{H}_2\text{O}$ )	52,7

- Menghitung massa padat dari aktivator dan prosentase perbandingan Fly Ash terhadap padatan aktivator

- Menghitung NaOH dalam wujud padat ( $W_{ph}$ ), dengan (Persamaan 2.1).

$$\text{NaOH}_{\text{padat}}(W_{ph}) = 52,7 \times 44\% = 23,4 \text{ Kg}$$

- Menghitung  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam wujud padat ( $W_{ps}$ ), dengan (Persamaan 2.2).

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3_{\text{padat}}(W_{\text{ps}}) = 184,5 \times (100\% - 52,7\%) = 87,3 \text{ Kg}$$

- Menghitung % Fly Ash dalam suatu campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering, dengan (Persamaan 2.3).

$$\% \text{Fly Ash} = \frac{364,9}{(364,9+23,4+87,3)} \times 100\% = 77\%$$

- Menghitung % aktivator padat dalam suatu campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering, dengan (Persamaan 2.4).

$$\% \text{Aktivator padat} = \frac{23,4+87,3}{(364,9+23,4+87,3)} \times 100\% = 23\%$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh perbandingan Fly Ash terhadap bahan alkali aktivator dalam wujud padat ialah:

$$\mathbf{77\% \text{ FA} : 23\% \text{ Aktivator}_{\text{padat}}}$$

## II. Perbandingan Padatan NaOH terhadap Padatan $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

Untuk perbandingan NaOH terhadap  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam wujud padat, dihitung dengan (Persamaan 2.5) dan (Persamaan 2.6).

- Menghitung % NaOH padat dalam suatu kesatuan aktivator padat

$$\% \text{NaOH}_{\text{padat}} = \frac{23,4}{(23,4 + 87,3)} \times 100\% = 21\%$$

- Menghitung %  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  padat dalam suatu kesatuan aktivator padat

$$\% \text{Na}_2\text{SiO}_3_{\text{padat}} = \frac{52,92}{(12,576 + 52,92)} \times 100\% = 79\%$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh perbandingan bahan alkali aktivator  $\text{NaOH}_{\text{padat}}$  terhadap  $\text{Na}_2\text{SiO}_3_{\text{padat}}$  ialah:

$$\begin{aligned} 21\% \text{NaOH}_{\text{padat}} & : 79\% \text{Na}_2\text{SiO}_3_{\text{padat}} \\ & \text{atau,} \\ 1 \text{NaOH}_{\text{padat}} & : 3,7 \text{Na}_2\text{SiO}_3_{\text{padat}} \end{aligned}$$

### III. Rasio Air Terhadap Bahan Pengikat

Seperti halnya bahan pengikat semen portland, maka bahan pengikat geopolimer dengan metode pencampuran kering (semen geopolimer) pun membutuhkan satu parameter penting yaitu rasio air terhadap semen (bahan pengikat) yang dihitung dengan persamaan berikut :

- Menghitung massa air dalam suatu larutan  $\text{NaOH}$  ( $W_{\text{w1h}}$ ), dengan (Persamaan 2.7).

$$\text{Air dalam larutan NaOH } (W_{\text{w1h}}) = 52,7 - 23,4 = 29,3 \text{ Kg}$$

- Menghitung massa air dalam suatu larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $W_{\text{w1s}}$ ), dengan (Persamaan 2.8).

$$\text{Air dalam larutan Na}_2\text{SiO}_3 (W_{\text{w1s}}) = 184,5 - 87,3 = 97,23 \text{ Kg}$$

- Menghitung massa air total ( $W_{\text{wtot}}$ ) dalam suatu larutan aktivator  $\text{NaOH}$  dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan (Persamaan 2.9).

$$\text{Air total dalam larutan aktivator } (W_{\text{wtot}}) = 29,3 + 97,23 = 126,53 \text{ Kg}$$

- Menghitung rasio air terhadap semen atau bahan pengikat padat (W/C Ratio), dengan (Persamaan 2.10).



$$W/C \text{ Ratio} = \frac{126,53}{(364,9+23,4+87,3)} = 0,27$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh rasio air terhadap semen (bahan pengikat) atau W/C Ratio = **0,27**

#### **IV. Parameter dalam desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering**

Berikut pada (Tabel 2.27) merupakan perbandingan massa pada desain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran basah dan metode pencampuran kering dari hasil konversi perhitungan pada campuran 1 hingga 12 pada penelitian Anuradha et al, 2011:

**Tabel 2. 27** Perbandingan nilai massa pada desain campuran bahan pengikat geopolimer metode basah dan keringa masing-masing variasi campuran pada penelitain Anuradha et al, 2011

Campuran	Metode Basah (Kg)			Metode Kering(Kg)				
	FA	Larutan NaOH	Larutan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	FA	Padatan NaOH	Padatan Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Air	w/c
1	364.90	52.70	184.50	364.90	23.40	87.27	126.53	0.27
2	419.70	68.50	171.10	419.70	30.41	80.93	128.26	0.24
3	482.60	68.50	171.10	482.60	30.41	80.93	128.26	0.22
4	555.00	68.50	171.10	555.00	30.41	80.93	128.26	0.19
5	638.20	68.50	171.10	638.20	30.41	80.93	128.26	0.17
6	483.70	89.80	224.60	483.70	39.87	106.24	168.29	0.27
7	554.70	103.00	257.50	554.70	45.73	121.80	192.97	0.27
8	483.70	82.20	205.50	483.70	36.50	97.20	154.00	0.25
9	554.70	89.80	224.60	554.70	39.87	106.24	168.29	0.24
10	554.70	82.20	205.50	554.70	36.50	97.20	154.00	0.22
11	364.90	83.00	207.30	364.90	36.85	98.05	155.40	0.31
12	447.00	89.80	224.60	447.00	39.87	106.24	168.29	0.28

Berikut pada (Tabel 2.28) merupakan parameter dalam mendesain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering dari beberapa variasi campuran pada penelitain Anuradha et al, 2011:

**Tabel 2. 28** Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering masing-masing variasi campuran pada penelitain Anuradha et al, 2011

Campuran	Parameter		
	FA : Aktivator padat	NaOH <sub>padat</sub> : Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> padat	W/C Ratio
1	77% : 23%	1 : 3,7	0,27
2	79% : 21%	1 : 2,7	0,24
3	81% : 19%	1 : 2,7	0,22
4	83% : 17%	1 : 2,7	0,19
5	85% : 15%	1 : 2,7	0,17
6	77% : 23%	1 : 2,7	0,27
7	77% : 23%	1 : 2,7	0,27
8	78% : 22%	1 : 2,7	0,25
9	79% : 21%	1 : 2,7	0,24
10	81% : 19%	1 : 2,7	0,22
11	77% : 23%	1 : 2,7	0,31
12	75% : 25%	1 : 2,7	0,28

Sebagai pembanding, parameter metode pencampuran basah dapat dilihat pada (Tabel 2.21)

## 2.5 Rangkuman Parameter optimum dalam mendesain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering (semen geopolimer)

Pada sub-bab ini akan dijelaskan tentang rekomendasi berupa rangkuman tentang batasan atau kisaran dari masing-masing parameter dalam mendesain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering. Untuk mendapatkan batasan atau kisaran tersebut, diawali dengan mengumpulkan seluruh hasil rincian perhitungan desain campuran dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hardjito, 2005 dan Anuradha et al, 2011 yang telah dikonversi menjadi metode kering.

Berikut merupakan parameter desain campuran dari seluruh variasi campuran baik dari penelitian Hardjito, 2005 dan Anuradha et al, 2011:

**Tabel 2. 29** Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering hasil konversi serta kuat tekan beton yang dihasilkan pada penelitian Hardjito, 2005

Mix	Parameter			Kuat Tekan Umur 7 Hari (MPa)*
	FA : AKT	NaOH <sub>(s)</sub> : Na <sub>2</sub> SiO <sub>3(s)</sub>	W/C	
2	88% : 12%	1 : 4,21	0,19	58
4	87% : 13%	1 : 2,73	0,17	68

\*Curing dengan temperature 60°C selama 24 jam

Berdasarkan (Tabel 2.29), dari dua jenis variasi campuran jelas bahwa campuran 4 merupakan campuran yang optimum, dikarenakan :

- a. Memiliki kuat tekan yang lebih tinggi
- b. Perbandingan NaOH<sub>(s)</sub> : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3(s)</sub> yang rendah membuat komposisi lebih hemat

**Tabel 2. 30** Parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering hasil konversi serta kuat tekan beton yang dihasilkan pada penelitian Anuradha et al, 2011

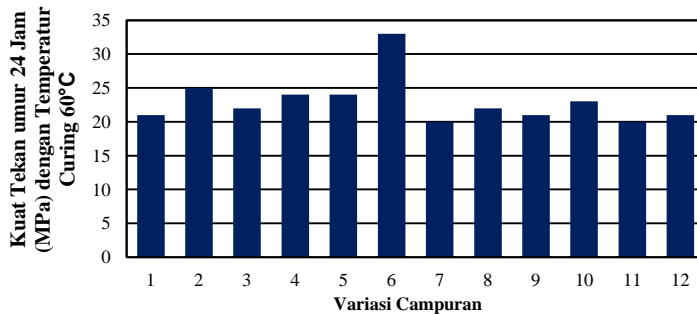
Mix	Parameter			Kuat Tekan Umur 24 Jam (MPa)*
	FA : AKT	NaOH <sub>(s)</sub> : Na <sub>2</sub> SiO <sub>3(s)</sub>	W/C	
1	77% : 23%	1 : 3,7	0,27	21
2	79% : 21%	1 : 2,7	0,24	25
3	81% : 19%	1 : 2,7	0,22	22
4	83% : 17%	1 : 2,7	0,19	24
5	85% : 15%	1 : 2,7	0,17	24
6	77% : 23%	1 : 2,7	0,27	33
7	77% : 23%	1 : 2,7	0,27	20
8	78% : 22%	1 : 2,7	0,25	22
9	79% : 21%	1 : 2,7	0,24	21
10	81% : 19%	1 : 2,7	0,22	23
11	77% : 23%	1 : 2,7	0,31	20
12	75% : 25%	1 : 2,7	0,28	21

\*Curing dengan temperature 60°C selama 24 jam

Sedangkan untuk penelitian Anuradha et al, 2011; diperlukan analisa lebih lanjut karena terdapat variasi campuran yang cukup banyak (15 variasi campuran). Analisa yang dimaksud ialah komposisi campuran optimum, berdasarkan:

- Nilai kuat tekan secara umum
- Pengaruh kandungan (%) alkali aktivator dalam kuat tekan yang dihasilkan
- Pengaruh rasio NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dalam kuat tekan yang dihasilkan
- Pengaruh rasio w/c dalam kuat tekan yang dihasilkan.

### A. Berdasarkan nilai kuat tekan secara umum

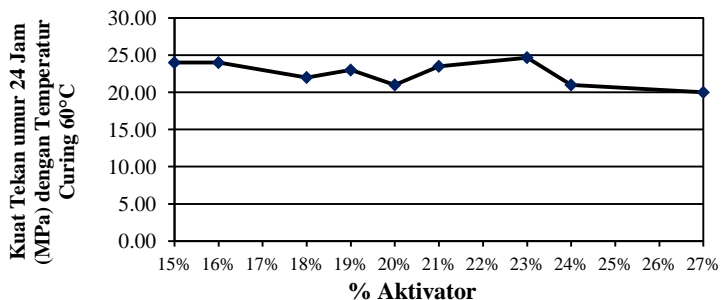


**Gambar 2. 14** Kuat tekan yang dihasilkan dari masing-masing variasi campuran (Anuradha et al, 2011)

Berdasarkan nilai kuat tekan secara umum pada (Gambar 2.14), campuran 6 merupakan campuran yang menghasilkan kuat tekan tertinggi. Adapun rincian parameter desain campurannya sebagai berikut:

- Fly : Aktivator<sub>padat</sub> = 77% : 23%
- NaOH<sub>(s)</sub> : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3 (s)</sub> = 1 : 2,7
- W/C Ratio = 0,17

### B. Berdasarkan Pengaruh kandungan (%) alkali aktivator dalam kuat tekan yang dihasilkan

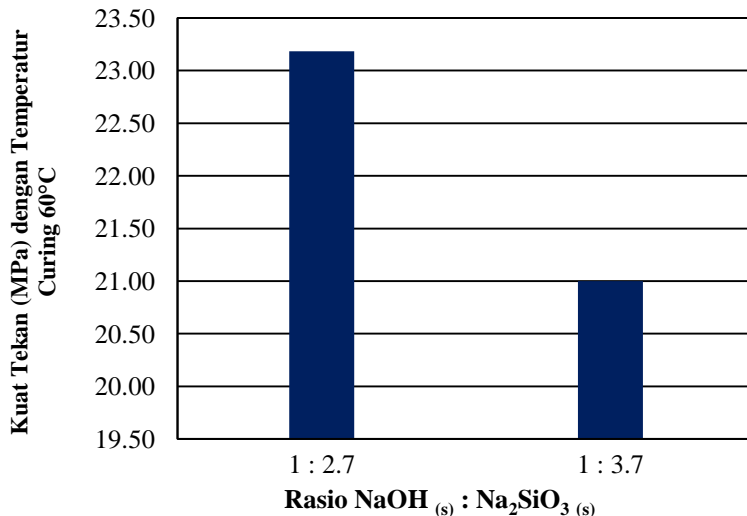


**Gambar 2. 15** Pengaruh kadar aktivator terhadap nilai kuat tekan dari masing-masing variasi campuran (Anuradha et al, 2011)

Berdasarkan grafik hubungan % alkali aktivator terhadap kuat tekan (Gambar 2.15), diperoleh % kadar akitvator optimum berada pada nilai:

- Fly Ash : Aktivator<sub>padat</sub> = 85% : **15%** (Minimum)
- Fly Ash : Aktivator<sub>padat</sub> = 77% : **23%** (Maksimum)

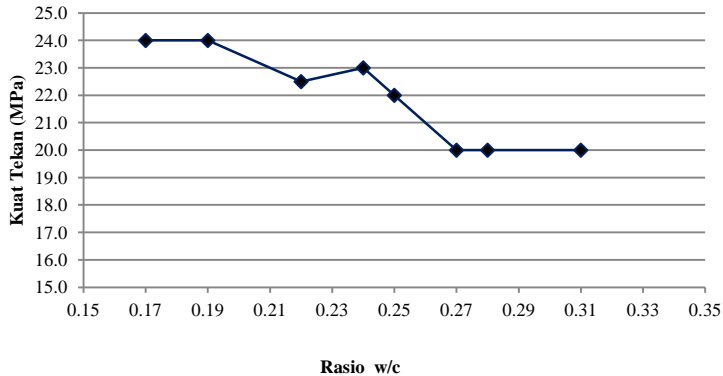
C. Berdasarkan Pengaruh rasio NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dalam kuat tekan yang dihasilkan



**Gambar 2. 16** Pengaruh rasio NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> padat terhadap nilai kuat tekan (Anuradha et al, 2011)

Berdasarkan grafik hubungan rasio NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> padat terhadap kuat tekan (Gambar 2.16), diperoleh rasio optimum dengan nilai **1 : 2,7**.

D. Berdasarkan Pengaruh rasio w/c dalam kuat tekan yang dihasilkan



**Gambar 2. 17** Pengaruh rasio w/c padat terhadap nilai kuat tekan (Anuradha et al, 2011)

Berdasarkan grafik hubungan rasio w/c terhadap kuat tekan (Gambar 2.17), diperoleh rasio optimum dengan nilai **0,17 – 0,19**.

Setelah dilakukan analisa, maka berikut pada (Tabel 2.31) merupakan kesimpulan akhir tentang batasan atau kisaran nilai yang direkomendasikan dalam desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering:

**Tabel 2. 31** Rangkuman parameter desain campuran bahan pengikat geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering

No.	Parameter	Nilai	Information
1	Fly Ash : Alkali Aktivator (Padat)	85% : 15%	Minimum
		77% : 23%	Maksimum
2	NaOH : Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (Padat)	1 : 2,73	Optimum
3	Rasio W/C	0,17	Minimum
		0,19	Maksimum

## 2.6 Perhitungan desain campuran beton geopolimer berbasis Fly Ash metode pencampuran kering

Perhitungan desain campuran beton geopolimer berbasis Fly Ash dengan metode pencampuran kering mengadopsi perhitungan metode pencampuran basah dan metode desain campuran beton semen portland. Berikut langkah-langkahnya:

### I. Menentukan berat jenis beton yang akan digunakan

Berat jenis beton geopolimer berbasis Fly Ash berkisar 2330 Kg/m<sup>3</sup> hingga 2430 Kg/m<sup>3</sup> (Hardjito dan Rangan, 2005). Dapat juga ditentukan sebesar 2400 Kg/m<sup>3</sup> dalam mendesain awal campuran beton geopolimer.

### II. Menentukan perbandingan bahan pengikat dan bahan pengisi

Agregat sebagai bahan pengisi pada beton geopolimer metode pencampuran basah kadarnya berkisar dari 75% - 80%, sehingga bahan pengikatnya berkisar 20%-25% dari berat total beton (Hardjito dan Rangan, 2005). Artinya dalam suatu campuran beton geopolimer terdapat massa bahan pengikat dengan nilai kisaran (dalam keadaan bahan pengikat basah) sebagai berikut:

- 20% x 2400 Kg/m<sup>3</sup> = 480 Kg/m<sup>3</sup>, hingga
- 25% x 2400 Kg/m<sup>3</sup> = 600 Kg/m<sup>3</sup>

Jika dikurandikonversi ke metode pencampuran kering, diperoleh bahan pengikat dengan massa:

- 480 Kg/m<sup>3</sup> - (480 Kg/m<sup>3</sup> x 0,19) = 388,8 Kg/m<sup>3</sup>, hingga
- 600 Kg/m<sup>3</sup> - (600 Kg/m<sup>3</sup> x 0,19) = 486,0 Kg/m<sup>3</sup>

Artinya, jika dikonversi ke wujud kering, % kadar bahan pengikat beton geopolimer berkisar 16,2% - 20,25%. Sehingga, bahan pengisinya berkisar 83,8% - 79,75%.



Sesuai pada sub-bab 2.1.1 dan 2.1.2, beton yang menggunakan bahan pengikat geopolimer dengan metode pencampuran kering (semen geopolimer) dalam aplikasi penggunaannya sama dengan mencampur semen portland (tinggal menambahkan air dengan faktor air semen tertentu). Dalam beton semen portland terdapat klasifikasi tentang perbandingan bahan pengikat dan bahan pengisi sesuai dengan mutu beton yang dihasilkan. Berikut pada (Tabel 3.32) penjelasannya:

**Tabel 2. 32** Klasifikasi kadar semen pada beton semen portland (Civil Engineering Memphis University, 2016)

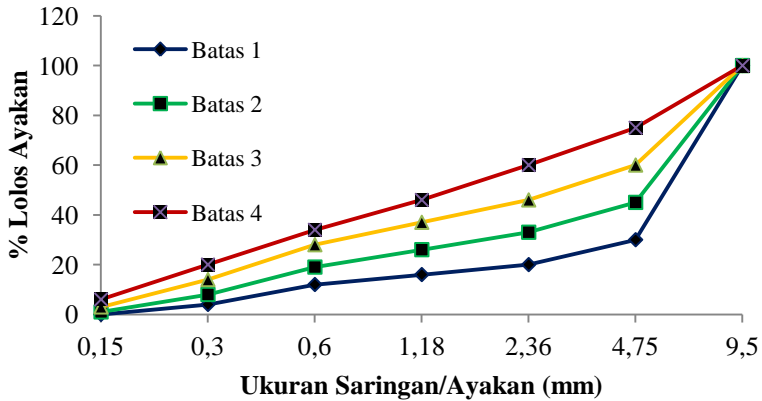
Kadar Semen (Kg/m <sup>3</sup> )	Level kadar Semen	Kadar Bahan Pengikat (%)	Kadar Bahan Pengisi (%)
200 - 400	Menengah	$8,3 \leq \text{kadar} \leq 16,6$	$83,4 \leq \text{kadar} \leq 91,7$
$400 < \text{KS} < 600$	Tinggi	$16,6 < \text{kadar} \leq 25$	$75 \leq \text{kadar} \leq 83,4$
$> 600$	Sangat Tinggi	$> 25$	$< 75$

### III. Menentukan perbandingan agregat kasar dan agregat halus

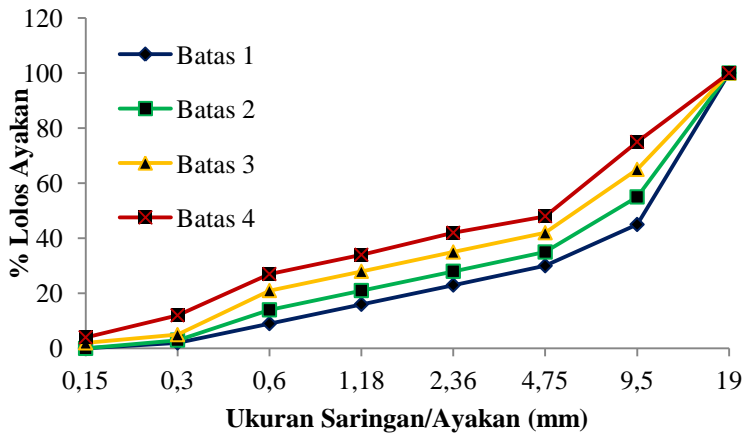
Perbandingan pembagian % kadar agregat kasar dan agregat halus dapat menggunakan metode grafik zona agregat gabungan pada Grafik 10 – 12 SNI 2834-2000.

**Tabel 2. 33** Tabel untuk menggambarkan batasan gradasi agregat gabungan dengan beberapa ukuran butir maksimum agregat (SNI 2834-2000)

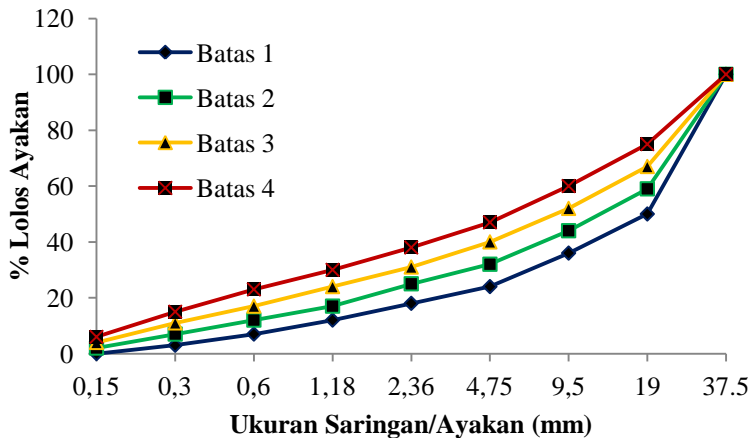
Ukuran Saringan/Ayakan (mm)	% Lolos Saringan/Ayakan											
	Ukuran Butir Maks 40 mm				Ukuran Butir Maks 20 mm				Ukuran Butir Maks 10 mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
37.5	100	100	100	100								
19	50	59	67	75	100	100	100	100				
9.5	36	44	52	60	45	55	65	75	100	100	100	100
4.75	24	32	40	47	30	35	42	48	30	45	65	75
2.36	18	25	31	38	23	28	35	42	20	33	46	60
1.18	12	17	24	30	16	21	28	34	16	26	37	46
0.6	7	12	17	23	9	14	21	27	12	19	28	34
0.3	3	7	11	15	2	3	5	12	4	8	14	20
0.15	0	2	4	6	0	0	2	4	0	1	3	6



**Gambar 2. 18** Grafik Zona Agregat Gabungan untuk Ukuran Maksimum Agregat 10 mm (SNI 2834-2000)



**Gambar 2. 19** Grafik Zona Agregat Gabungan untuk Ukuran Maksimum Agregat 20 mm (SNI 2834-2000)

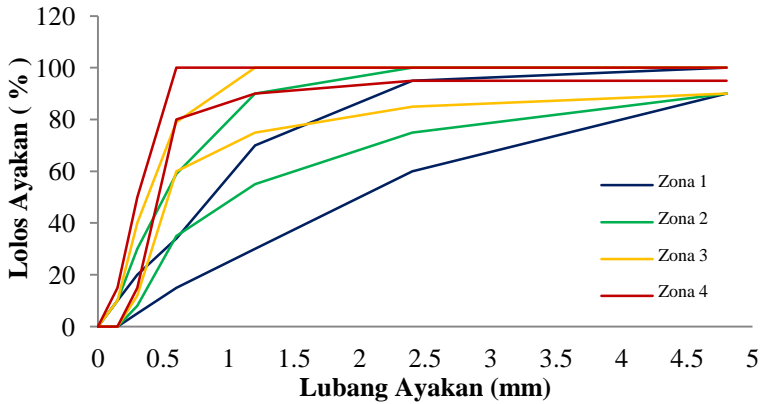


**Gambar 2. 20** Grafik Zona Agregat Gabungan untuk Ukuran Maksimum Agregat 40 mm (SNI 2834-2000)

Tentu sebelumnya, agregat kasar dan halus harus dilakukan uji analisa ayakan agar datanya dapat diproses dan diketahui berapa prosentase masing-masing agregat untuk dapat masuk kedalam zona agregat gabungan tersebut. Proses pengujian analisa ayakan agregat mengacu pada ASTM C136 dan zona gradasi mengacu pada SNI 2834-2000.

**Tabel 2. 34** Zona Gradasi Agregat Halus (SNI 2834-2000)

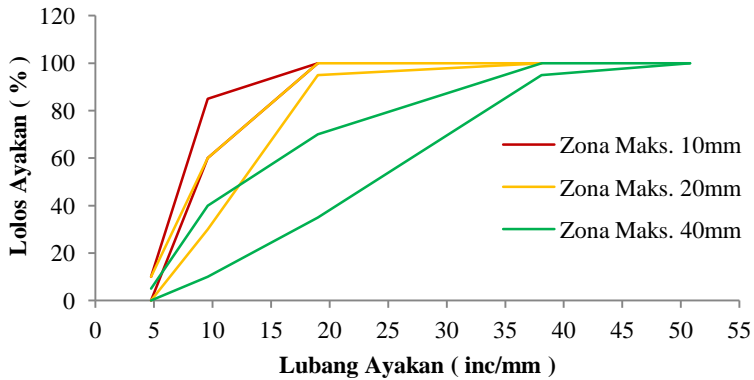
Ukuran Saringan/Ayakan (mm)	% Lolos Saringan/Ayakan							
	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
	Batas Bawah	Batas Atas	Batas Bawah	Batas Atas	Batas Bawah	Batas Atas	Batas Bawah	Batas Atas
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	0	10	0	10	0	10	0	15
0.3	5	20	8	30	12	40	15	50
0.6	14	34	35	59	60	79	80	100
1.2	30	70	55	90	75	100	90	100
2.4	60	95	75	100	85	100	95	100
4.8	90	100	90	100	90	100	95	100



**Gambar 2. 21** Grafik Zona Gradasi Agregat Halus (SNI 2834-2000)

**Tabel 2. 35** Zona Gradasi Agregat Kasar (SNI 2834-2000)

Ukuran Saringan/Ayakan (mm)	% Lolos Saringan/Ayakan					
	Zona Maks. 10mm		Zona Maks. 20mm		Zona Maks. 40mm	
	Batas Bawah	Batas Atas	Batas Bawah	Batas Atas	Batas Bawah	Batas Atas
4.75	0	10	0	10	0	5
9.60	60	85	30	60	10	40
19.00	100	100	95	100	35	70
38.1	100	100	100	100	95	100
50.80	100	100	100	100	100	100



**Gambar 2. 22.** Grafik Zona Gradasi Agregat Kasar (SNI 2834-2000)

Zona gradasi agregat halus yang direkomendasikan ialah zona 2, dan ukuran agregat kasar 5 mm - 12,5 mm untuk menghasilkan kuat tekan yang tinggi (Jeyasehar et al, 2013).

#### IV. Menentukan perbandingan air terhadap bahan pengikat (W/C Ratio)

Untuk rasio air terhadap bahan pengikat geopolimer metode pencampuran kering (semen geopolimer) dapat menggunakan acuan awal sesuai pada (Tabel 2.31) yaitu berkisar 0,18 – 0,20.

#### V. Menyesuaikan hasil akhir desain campuran dengan kebutuhan air terkoreksi terhadap hasil uji kadar air dan penyerapan agregat

Penyesuaian atau koreksi desain campuran yaitu kebutuhan air terkoreksi terhadap hasil pengujian kadar air dan penyerapan agregat dihitung dengan langkah-langkah seperti berikut:

##### a. Menyajikan hasil desain campuran sebelum dikoreksi

**Tabel 2. 36** Komposisi Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash dengan Metode Pencampuran Kering (Semen Geopolimer) dan Notasinya

<b>Material</b>	<b>Notasi</b>
Bahan Geopolimer Kering (Semen Geopolimer)	$W_{FA}$
Agregat Kasar	$W_{AK}$
Agregat Halus	$W_{AH}$
Air	$W_w$

##### b. Menyajikan hasil uji kadar air dan penyerapan agregat

**Tabel 2. 37** Standar dan Notasi Pengujian Kadar Air dan Penyerapan Agregat

<b>Pengujian</b>	<b>Standar</b>	<b>Notasi</b>
Kadar Air Agregat Kasar	ASTM C566	$\%KA_{AK}$
Kadar Air Agregat Halus	ASTM C566	$\%KA_{AH}$
Penyerapan Agregat Kasar	ASTM C127	$\%P_{AK}$
Penyerapan Agregat Halus	ASTM C128	$\%P_{AH}$

c. Menghitung kebutuhan air terkoreksi

Massa agregat kasar dan halus terkoreksi, dihitung dengan (Persamaan 2.11) dan (Persamaan 2.12) sebagai berikut:

$$\text{Massa Agregat Kasar Terkoreksi } (W_{AK'}) = W_{AK} + (\%K_{AK} - \%P_{AK}) \times W_{AK} \quad (2.11)$$

$$\text{Massa Agregat Halus Terkoreksi } (W_{AH'}) = W_{AH} + (\%K_{AH} - \%P_{AH}) \times W_{AH} \quad (2.12)$$

Dari persamaan tersebut, maka akan diketahui seberapa besar kebutuhan air tambahan untuk menyesuaikan dengan hasil pengujian kadar air dan penyerapan agregat. Kebutuhan air tambahan dan kebutuhan air total terkoreksi dihitung masing-masing dengan (Persamaan 2.13) dan (Persamaan 2.14) berikut:

$$\text{Kebutuhan Air Tambahan } (W_{W'}) = (W_{AK'} - W_{AK}) + (W_{AH'} - W_{AH}) \quad (2.13)$$

$$\text{Kebutuhan Air Total Terkoreksi } (W_{W\text{Tot}}) = W_W + W_{W'} \quad (2.14)$$

## 2.7 Pengujian-pengujian pada material penyusun, pasta, dan beton

### 2.7.1 Pengujian pada material penyusun (XRF, XRD, PSD)

#### I. XRF (X-Ray Fluorescences)

XRF bertujuan untuk mengetahui secara kualitatif dan kuantitatif kandungan unsur suatu material (Karyasa, 2013). Pada penelitian geopolimer pengujian ini digunakan untuk menguji material seperti: Fly Ash, Kaolin, Blast Furnce Slag, dan material sejenis lainnya. Untuk geopolimer berbasis Fly Ash, hasil pengujian XRF nya digunakan untuk menentukan tipe Fly Ash *Low Calcium* atau *High Calcium* dan Tipe C atau Tipe F (Lihat Sub bab 2.2.3).

## II. LOI (Loss on Ignition)

LOI merupakan suatu metode pengujian yang bertujuan untuk mengestimasi kandungan karbon yang tidakterbakar dalam suatu material salah satunya Fly Ash (Mohebbi et al, 2015). Fly Ash (Tipe C atau F) untuk beton memiliki standar LOI maksimum 6% (ASTM C618-12)

## III. XRD (X-Ray Diffractometry)

XRD bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan mineral maupun senyawa, seperti: Quartz, Mulite, Kaolinit dan mineral lainnya. Mineral Quartz dan Mulite merupakan mineral yang banyak ditemukan dalam Fly Ash Tipe F (Abdullah et al, 2013). Sementara dalam Tipe C mengandung: Quartz, Periclase, Anyhydrite, lime, C3A, dan C4A<sub>3</sub>S (Tishmack, 1999). Selain itu XRD juga untuk mengidentifikasi material yang bersifat kristal dan amorf. Kandungan Kristal dan amorfus dalam suatu material dapat membantu mengetahui tingkat kereaktifan suatu material (Abdullah et al, 2013).

## IV. PSD (Particle Size Distribution)

PSD bertujuan untuk mengetahui sebaran butiran suatu material dengan ukuran butiran dari yang berukuran 0,02 – 2000 µm menggunakan teori Franhofer yaitu prinsip *laser light scattering* (Halder, 2013). Sebagai contoh hasil pengujian PSD dapat dilihat pada (Gambar 2.9, 2.10, dan 2.11) serta (Tabel 2.11).

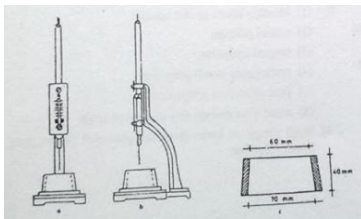
### 2.7.2 Pengujian pada pasta dan Beton (Waktu Ikat, Kuat Tekan dan UPV)

#### I. Waktu Ikat (Setting Time)

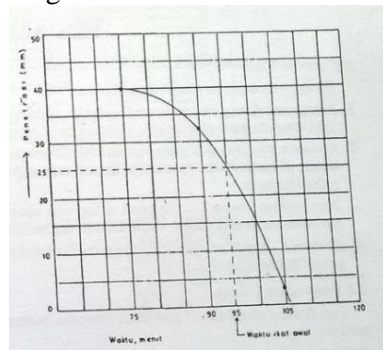
Pengujian waktu ikat (Setting Time) bertujuan untuk mengetahui waktu pengikatan awal dan akhir bahan pengikat

semen portland untuk pekerjaan sipil dan dapat pula digunakan untuk bahan pengikat (pasta) geopolimer. Standar proses pengujian waktu ikat mengacu pada ASTM C191. Pengujian ini tergolong pengujian tentang workabilitas atau tingkat kemudahan pengerjaan.

Waktu ikat awal adalah waktu yang diperlukan oleh pasta semen untuk mengubah sifatnya dari kondisi cair menjadi padat, biasanya ditandai dengan penurunan penetrasi jarum vicat sedalam 25 mm. Sedangkan waktu ikat akhir adalah waktu di mana penetrasi jarum vicat tidak terlihat secara visual atau - bacaan jarum masih menunjukkan angka 50 mm.



(a)



(b)

**Gambar 2. 23** Alat Vicat dan Cetakan Benda Uji (a) dan Contoh Grafik Penetrasi Jarum Vicat pada Pengujian Waktu Ikat (b)

## II. Kuat Tekan

Peguajian kuat tekan ditujukan untuk mengetahui nilai kuat tekan secara aktual pada sampel pasta, mortar, maupun beton dalam kondisi keras menggunakan mesin uji kuat tekan hingga sampel benar-benar hancur (ASTM C39). Ukuran sampel dapat dilihat pada (Tabel 2.38 ) berikut:



**Tabel 2. 38** Macam-Macam Bentuk dan Dimensi Sampel Pengujian Kuat Tekan

Bentuk Sampel	Dimensi	Kegunaan	Satuan
Silinder	15 cm x 30 cm	Mortar dan Beton	MPa atau N/mm <sup>2</sup> (fc')
	10 cm x 20 cm		
	2,5 cm x 5 cm	Pasta	
Kubus	20 cm x 20 cm x 20 cm	Mortar dan Beton	K (Kg/cm <sup>2</sup> )
	15 cm x 15 cm x 15 cm		
	10 cm x 10 cm x 10 cm		
	5 cm x 5 cm x 5 cm	Pasta	

Umur pengujian kuat tekan yang umum digunakan sebagai acuan ialah 28 hari pada beton semen portland. Untuk memprediksi nilai kuat tekan lebih cepat, umumnya pada beton semen portland digunakan nilai korelasi pada pengujian umur 3, 7, 14 dan 21 hari (PBI 1971). Umur pengujian dan korelasi terhadap 28 hari dapat dilihat sebagai berikut pada (Tabel 2.39):

**Tabel 2. 39** Umur Pengujian Beton dan Korelasinya dalam beton semen portland (PBI 1971)

Umur Beton (Hari)	3	7	14	21	28
Korelasi	0,4	0,65	0,88	0,95	1,00

Menurut ASTM C 39/C39M-05, nilai kuat tekan beton dapat dihitung dengan (Persamaan 2.15 ) sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.15)$$

Dimana,

$\sigma$  = Tegangan tekan (Kg/cm<sup>2</sup>, N/mm<sup>2</sup> atau MPa)

P = Beban ultimate (N,kN, Kg, atau Ton)

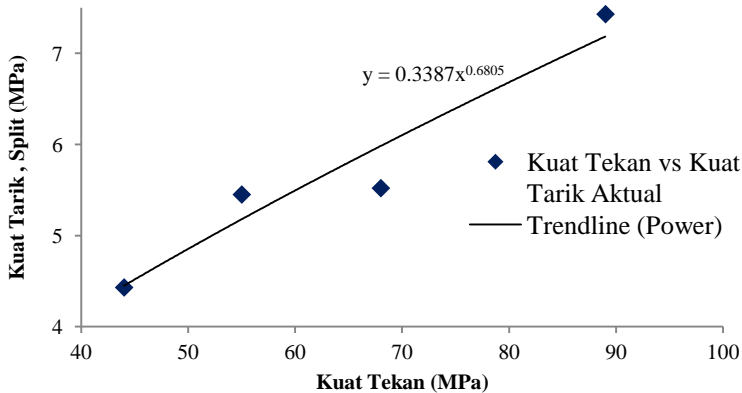
A = Luas penampang (mm<sup>2</sup> atau cm<sup>2</sup>)

Klasifikasi mutu beton berdasarkan nilai kuat tekan dapat dilihat pada (Tabel 2,40):

**Tabel 2. 40** Klasifikasi Mutu Beton Berdasarkan Nilai Kuat Tekan (DPU, 2007)

Level	$f_c'$ (Mpa)	$\sigma_{bk}'$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Mutu Tinggi Struktural	$40 < f_c' \leq 65$	$500 < K \leq 800$
Mutu Sedang Struktural	$20 < f_c' \leq 40$	$250 < K \leq 450$
Non Struktural	$10 \leq f_c' \leq 20$	$125 \leq K \leq 250$

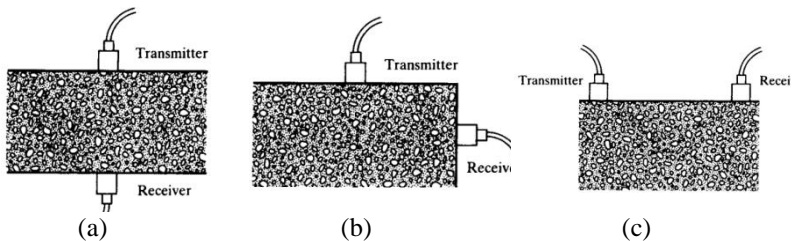
Hasil pengujian kuat tekan juga dapat memprediksi untuk mendapatkan nilai kuat tarik belah atau splitting tensile strength suatu beton. Dalam penelitian Hardjito, 2005; tentang beton geopolimer berbasis Fly Ash, disajikan nilai kuat tekan aktual dan kuat tarik belah atau split tensile strength aktual yang dapat dijadikan grafik dan diambil persamaan trendline tersebut untuk memperoleh prediksi nilai kuat tarik belah.



**Gambar 2. 24** Trendline (Power) dan Persamaan untuk Mengestimasi Nilai Kuat Tarik Belah Beton Atau Split Tensile Strength melalui Hasil Pengujian Kuat Tekan (Hardjito, 2005)

### III. UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) adalah metode untuk memperkirakan kekuatan beton yang didasarkan pada hubungan kecepatan gelombang pulsa ultrasonic melalui media beton (International Atomic Agency, 2002). Prinsip kerja alat UPV adalah dengan memproduksi dan menyalurkan gelombang pulsa/denyut ke dalam beton, dan merata-rata waktu perjalanan gelombang tersebut dari titik awal (Transmitter) ke titik akhir (Receiver) instrument UPV pada suatu media beton (Neville dan Brooks, 2010). Dalam pengujian UPV terdapat 3 (tiga) metode yaitu: Direct Transmission (Transmisi Langsung), Semi-Direct Transmission (Transmisi Semi-Langsung), dan Indirect / Surface Transmission (Transmisi Tidak Langsung/permukaan) (Neville dan Brooks, 2010).



**Gambar 2. 25** Metode Penyebaran dan Penerimaan Gelombang Pulsa Ultrasonic: (a) Direct Transmission, (b) Semi-Direct Transmission, dan Indirect / Surface Transmission (Neville dan Brooks, 2010)

Kecepatan ( $V$ ) dihitung dengan (Persamaan 2.16) berikut:

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.16)$$

Dimana,

$V$  = Kecepatan Gelombang (Km/detik)

$L$  = Panjang Lintasan / Jarak Transmitter ke Receiver pada Suatu Media Beton (cm atau km)

$T$  = Waktu (Detik)

Indirect Transmission biasanya digunakan untuk mengukur kedalaman retakan, sedangkan Direct Transmission biasa digunakan dalam mengukur tingkat kepadatan beton, estimasi kuat tekan, hingga memprediksi nilai modulus elastisitas beton (Neville dan Brooks, 2010).

Karakteristik kualitas beton berdasarkan hasil uji UPV dapat diklasifikasikan menurut Indian Standards (IS 1331101-1992), seperti pada (Tabel 2.41) berikut:

**Tabel 2. 41** Kriteria Kecepatan Gelombang Pulsa untuk Mengklasifikasi Kualitas Beton (IS 1331101-1992)

<b>Kecepatan Gelombang Pulsa, V (Km/detik)</b>	<b>Kualitas beton</b>
$4 < V \leq 5$	Istimewa
3,5 - 4,5	Baik
3,0 - 3,5	Sedang
$< 3$	Meragukan

Menurut penelitian Reufi dan Beer, 2016; hubungan modulus elastisitas dengan UPV untuk suatu material dapat diprediksi dengan (Persamaan 2.17) berikut:

$$E = \frac{Vl^2\rho(1+V)(1-2V)}{1-V} \quad (2.17)$$

Dimana,

E = Modulus Elastisitas (MPa)

Vl = Kecepatan gelombang pulsa UPV Test (m/detik)

$\rho$  = Densitas material ( $\text{Kg/m}^3$ )

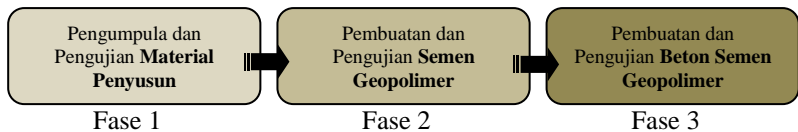
v = Koefisien Poisson

Koefisien Poisson dalam beton geopolimer berbasis Fly Ash memiliki kisaran nilai 0,13 – 0,16 atau rata-rata sebesar 0,1375 (Hardjito, 2005).

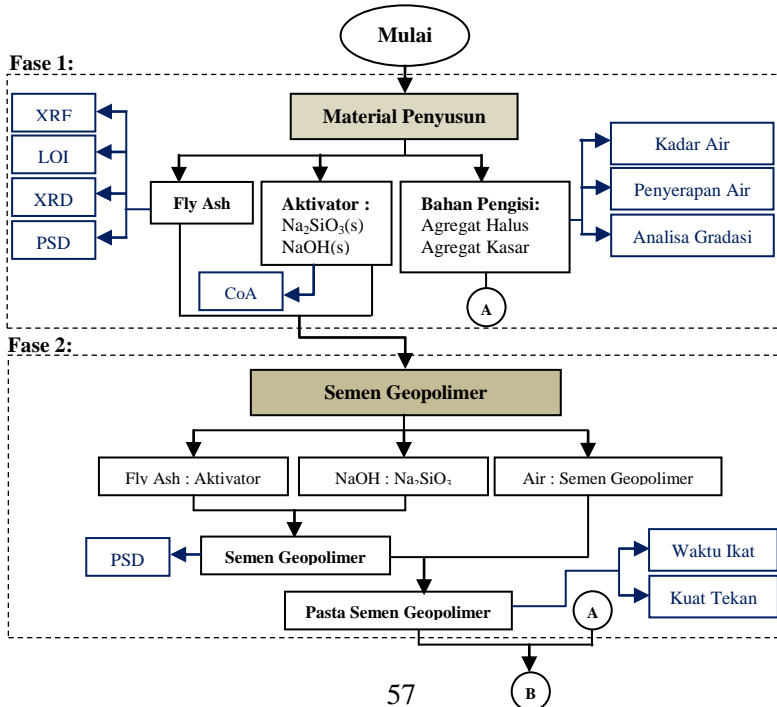
## BAB III METODE PENELITIAN

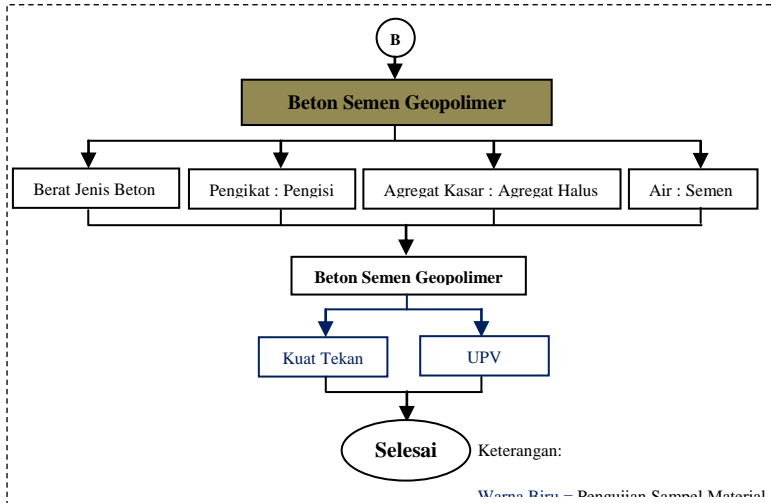
### 3.1 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Pada sub-bab ini akan dijelaskan secara umum tahapan atau metodologi pelaksanaan kegiatan penelitian beton geopolimer berbasis fly ash yang dilakukan. Adapun diagram alir tersebut seperti pada (Gambar 3.1 dan 3.2) berikut:



**Gambar 3. 1** Fase Kegiatan Penelitian Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash



**Fase 3:**

**Gambar 3. 2** Diagram Alir Kegiatan Penelitian Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash

### 3.2 Detail Metodologi Pelaksanaan Penelitian

Dari sub-bab 3.1 telah dijelaskan bahwa terdapat 3 (tiga) fase kegiatan dalam penelitian beton geopolimer berbasis fly ash ini, yaitu: pengumpulan dan pengujian material penyusun, pembuatan dan pengujian semen geopolimer, serta pembuatan dan pengujian beton semen geopolimer. Berikut merupakan detail pelaksanaan kegiatan penelitian dari masing-masing fase tersebut:

#### 3.2.1 Pengumpulan dan Pengujian Material Penyusun

Berikut akan dijabarkan tentang material penyusun yang digunakan beserta spesifikasinya.

### 3.2.1.1 Fly Ash

Dalam penelitian ini, digunakan Fly Ash satu jenis yang berasal dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) PT. IPOMI Paiton, Jawa Timur, Indonesia pada tahun 2016. Untuk mengetahui komposisi kimia dari Fly Ash tersebut dilakukan pengujian XRF (X-Ray Fluorescence) di Laboratorium XRF PT. Semen Gresik, PT. Semen Indonesia (persero) Tbk grup, di Kabupaten Tuban, Jawa Timur, Indonesia, pada Desember 2016. Selain itu juga dilakukan pengujian LOI (Loss on Ignition) dengan metode gravimetri di Laboratorium Fisika PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, di Kabupaten Gresik, Jawa Timur, Indonesia pada Mei 2017. Hasil XRF dan LOI dapat dilihat pada (Tabel 3.1). Dari hasil tersebut Fly Ash tergolong jenis High Calcium Fly Ash sesuai ASTM C618-12 (Lihat sub-bab 2.2.3 dan 2.7.1).

**Tabel 3. 1** Komposisi Kimia Fly Ash yang Ditetapkan Berdasarkan Pengujian XRF dan LOI

Oksida	%	% Aktiv	% T. Aktiv
SiO <sub>2</sub>	36,650	18,002	18,648
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,740	6,749	6,991
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,140	11,366	11,774
CaO	15,330	15,330	0,000
Na <sub>2</sub> O	1,960	0,963	0,997
K <sub>2</sub> O	1,100	0,540	0,560
TiO <sub>2</sub>	0,709	0,348	0,361
MgO	5,790	5,790	0,000
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,213	0,105	0,108
SO <sub>3</sub>	1,080	0,530	0,550
MnO	0,186	0,091	0,095
Oksida Lain	0,102	0,050	0,052
LOI	0,686		

\* Hasil XRF ditinjau lagi dengan hasil XRD untuk mengetahui kandungan yang aktif dan tidak (lihat tabel 3.2)



(a)



(b)

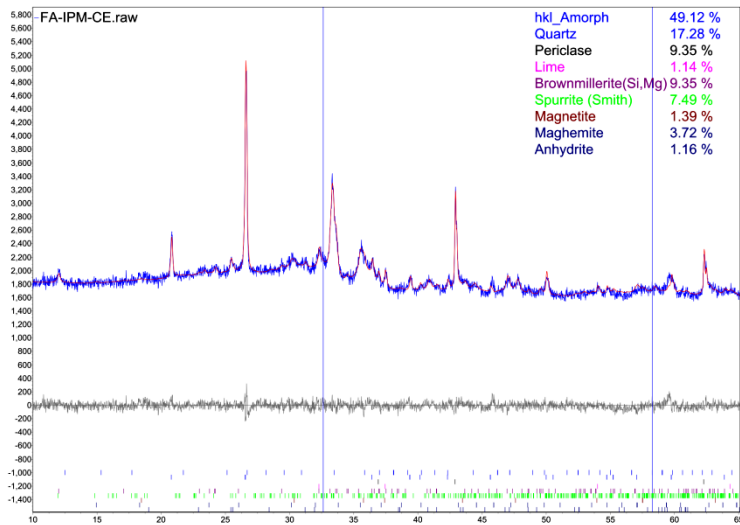
**Gambar 3. 3** Dokumentasi: Pengujian XRF di Lab. PT. Semen Gresik Pabrik Tuban (a), Pengujian LOI di Lab. Fisika PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, Gresik



**Gambar 3. 4** Wujud Fisik Fly Ash PLTU Paiton PT. IPMOMI

Untuk mengetahui kandungan senyawa dan mineral yang terkandung, serta sifat amorf dan kristal dalam Fly Ash tersebut, dilakukan pengujian XRD (X-Ray Diffractometry) di Laboratorium XRD di Laboratorium XRD PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, di Kabupaten Gresik, Jawa Timur, Indonesia pada Desember 2016. Hasil XRD dapat dilihat pada (Gambar 3.5) dan (Tabel 3.2).



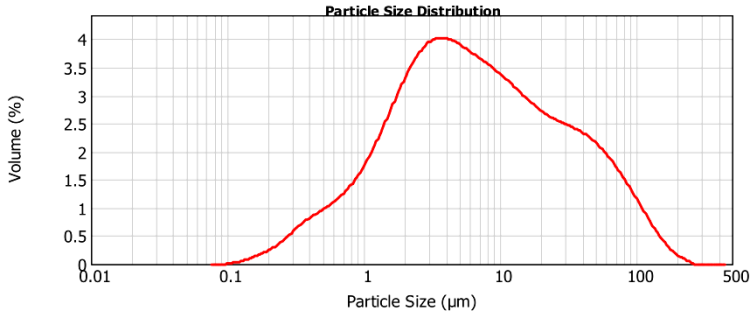


**Gambar 3. 5** Pola XRD dan kandungan mineral pada Fly Ash PLTU PT. IPMOMI Paiton, Jawa Timur, Indonesia

**Tabel 3. 2** Kandungan Mineral pada Fly Ash PLTU PT. IPMOMI Paiton, Jawa Timur, Indonesia Hasil Pengujian XRD

Mineral	%	Keterangan
Hkl_Amorph	49,12	Amorph (Aktif)
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	17,28	Kristal (T.Aktiv)
Periclase (MgO)	9,35	Kristal (Aktif)
Lime (CaO)	1,14	Kristal (Aktif)
Brownmillerite (Si,Mg)	9,35	Kristal (T. Aktiv)
Spurrite (Ca <sub>5</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	7,49	Kristal (Aktif)
Magnetite (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	1,39	Kristal (T. Aktiv)
Maghemite (γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,72	Kristal (T, Aktiv)
Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	1,16	Kristal (Aktif)

Untuk mengetahui distribusi sebarab ukuran partikel Fly Ash tersebut, dilakukan pengujian PSD di Laboratorium PSD PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, di Kabupaten Gresik, Jawa Timur, Indonesia pada Desember 2016. Hasil PSD dapat dilihat pada (Gambar 3.6) dan (Tabel 3.3).



**Gambar 3. 6** Grafik Sebaran Ukuran Partikel (Particle Size Distribution-PSD) pada Fly Ash PLTU PT. IPMOMI Paiton, Jawa Timur, Indonesia

**Tabel 3. 3** partikel yang tertahan dan tertahan kumulatif di masing-masing ukuran pengujian PSD pada Fly Ash PLTU PT. IPMOMI Paiton, Jawa Timur, Indonesia

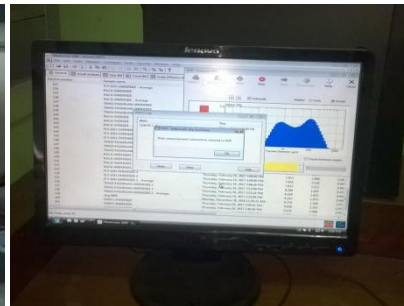
Size (µm)	Tertahan (%)	Tertahan Kumulatif (%)	Size (µm)	Tertahan (%)	Tertahan Kumulatif (%)
0.500	4.12	4.12	3.000	4.59	31.03
1.000	5.83	9.95	5.000	13.33	44.36
1.046	0.52	10.47	10.000	16.57	60.93
1.487	5.06	15.53	15.000	8.45	69.38
1.500	0.15	15.68	20.000	5.35	74.73
1.505	0.05	15.73	25.000	3.86	78.59
2.000	5.55	21.28	32.000	4.07	82.66
2.500	5.16	26.44	36.000	1.87	84.53

Size ( $\mu\text{m}$ )	Tertahan (%)	Tertahan Kumulatif (%)
38.000	0.84	85.37
40.000	0.79	86.16
45.000	1.77	87.93
50.000	1.52	89.45
53.000	0.82	90.27
56.000	0.74	91.01
63.000	1.51	92.52
71.000	1.42	93.94
75.000	0.6	94.54
80.000	0.67	95.21
90.000	1.11	96.32
100.000	0.86	97.18

Size ( $\mu\text{m}$ )	Tertahan (%)	Tertahan Kumulatif (%)
106.000	0.42	97.6
112.000	0.36	97.96
125.000	0.61	98.57
140.000	0.5	99.07
150.000	0.24	99.31
160.000	0.08	99.39
180.000	0.34	99.73
200.000	0.14	99.87
212.000	0.05	99.92
224.000	0.03	99.95
250.000	0.05	100



(a)



(b)

**Gambar 3. 7** Dokumentasi Pengujian PSD di Lab. PSD PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, Gresik: (a) Instrumen Malvern MS (Mastersizer) 2000, (b) Software pengolahan data PSD

### 3.2.1.2 Alkali Aktivator

Dalam penelitian ini, digunakan kombinasi alkali aktivator, yaitu: Natrium Hidroksida, NaOH, padat atau flake 98% dan Natrium Silikat Pentahidrat padat,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , granular. Kedua aktivator tersebut merupakan grade teknis. NaOH padat didapatkan dari PT. Tjiwi Kimia, Jawa Timur, Indonesia, dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  padat, produksi China yang didapatkan dari Toko Bahan Kimia di Surabaya, Jawa Timur, Indonesia. Tipikal spesifikasi teknis kandungan kimia atau senyawa pada alkali aktivator tersebut, masing-masing dapat dilihat pada (Tabel 3.4) dan (Tabel 3.5).



**Gambar 3. 8** Alkali Aktivator padat: (a) NaOH Flake, (b)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  Granular

**Tabel 3. 4** Tipikal Komposisi Kimia pada Sodium Hidroksida Flake 98% (Cristal Company, 2016)

Parameter	Nilai %
Sodium Hidroksida (NaOH)	98 min
Residual Water ( $\text{H}_2\text{O}$ )	1 max. (ppm)
Sodium Carbonate ( $\text{NaCO}_3$ )	0,5 max. (ppm)
Chloride (NaCl)	150 max. (ppm)
Iron (Fe)	5 max. (ppm)
Nickel (Ni)	5 max. (ppm)

**Tabel 3. 5** Tipikal Komposisi Senyawa Kimia pada Sodium Silikat Pentahidrat (PQ Corporation, 2009)

Oksida	Kadar %
SiO <sub>2</sub>	28,5
Na <sub>2</sub> O	28,7
LOI, 800°C	43,0

### 3.2.1.3 Agregat

Dalam penelitian ini, digunakan kombinasi agregat halus dan agregat kasar sebagai bahan pengisi pada beton. Agregat halus yang diatur agar memenuhi zona 2 sesuai saran pada penelitian Jayasehar et al, 2013 (Lihat sub-bab 2.6 Poin III), dan agregat kasar 5 – 10 mm (berasal dari proses crushing untuk menghasilkan bentuk yang tidak pipih) menyesuaikan ukuran cetakan benda uji beton, yaitu: 5 cm x 5 cm x 5 cm. Agregat halus dan kasar yang digunakan, masing-masing berasal dari Lumajang dan Pasuruan Jawa Timur, Indonesia. Berikut pada (Gambar 3.9 dan 3.10) , serta (Tabel 3.6 dan 3.7), merupakan spesifikasi agregat berdasarkan hasil pengujian gradasi agregat berdasarkan standar ASTM C136 dan SNI 2834-2000.

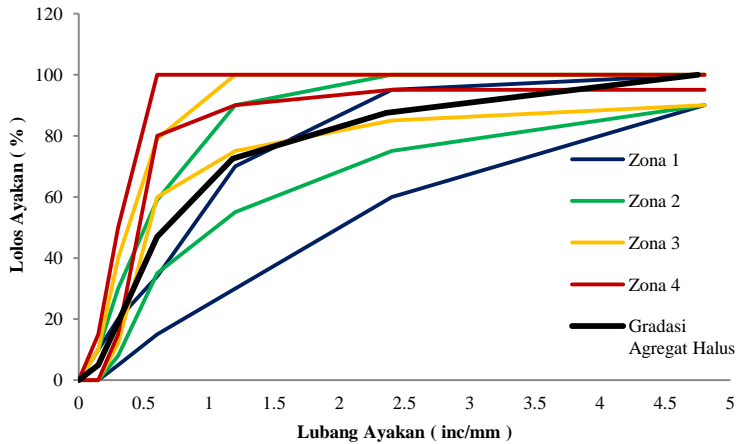
**Tabel 3. 6** Hasil Pengujian Analisa Ayakan Agregat Halus Pasir Lumajang, Jawa Timur, Indonesia

Lubang Ayakan (mm)	Pasir 1000 gram			
	Tertahan (gram)	Tertahan (%)	Tertahan Kumulatif, E (%)	lolos (%)
4.75	0	0.00	0.00	100.00
2.36	125	12.50	12.50	87.50
1.18	150	15.00	27.50	72.50
0.6	255	25.50	53.00	47.00
0.3	280	28.00	81.00	19.00
0.15	140	14.00	95.00	5.00

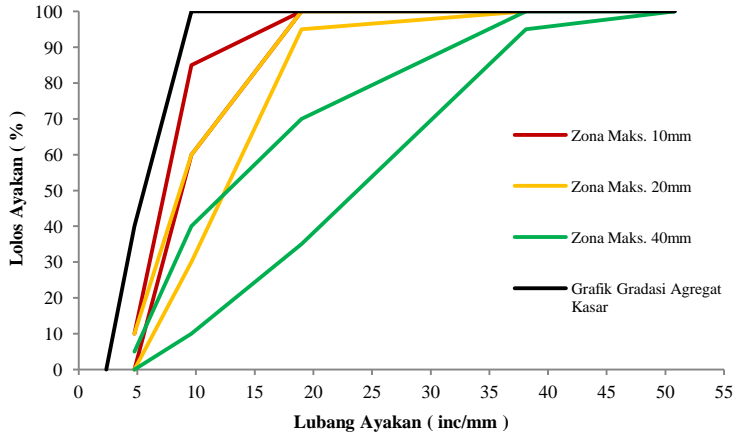
Lubang Ayakan (mm)	Pasir 1000 gram			
	Tertahan (gram)	Tertahan (%)	Tertahan Kumulatif, E (%)	lolos (%)
0	50	5.00	100.00	0.00
<b>Jumlah:</b>	1000	100.00	369.00	
<b>Modulus Kehalusan:</b>	3.69			

**Tabel 3. 7** Hasil Pengujian Analisa Ayakan Agregat Kasar Batu Pecah Pasuruan, Jawa Timur, Indonesia

lubang ayakan (mm)	Agregat Kasar 1600 gram			
	Tertahan (gram)	Tertahan (%)	Tertahan Kumulatif, E (%)	lolos (%)
4.75	960	60.00	60.00	40.00
2.36	640	40.00	100.00	0.00
1.18	0	0.00	100.00	0.00
0.6	0	0.00	100.00	0.00
0.3	0	0.00	100.00	0.00
0.15	0	0.00	100.00	0.00
0	0	0.00	100.00	0.00
<b>Jumlah:</b>	1600	100.00	660.00	
<b>Modulus Kehalusan:</b>	6.6			



**Gambar 3. 9** Grafik Gradasi Agregat Halus Pasir Lumajang yang Menunjukkan Hasil Zona 2



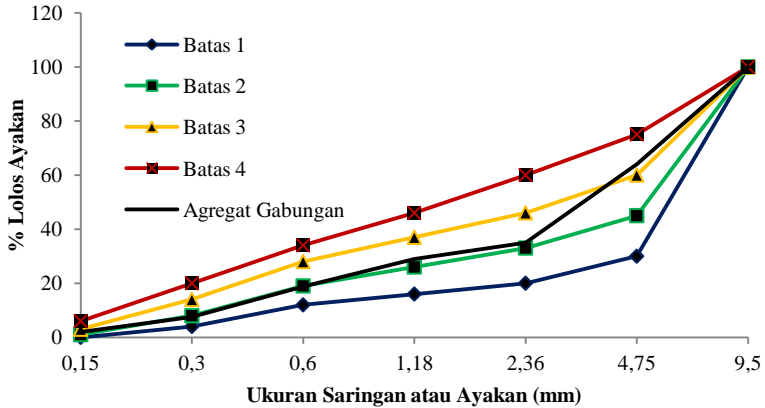
**Gambar 3. 10** Grafik Gradasi Agregat Kasar Batu Pecah Pasuruan yang Menunjukkan Hasil Zona Maks. Ukuran Agregat 10 mm.

Melalui hasil analisa ayakan agregat halus dan kasar tersebut, selanjutnya ialah menentukan zona agregat gabungan untuk mengetahui prosesntase perbandingan agregat halus dan agregat kasar sesuai metode grafik SNI 2834-2000. Telah diketahui bahwa ukuran agregat maksimum ialah 10 mm, maka grafik yang digunakan juga grafik zona agregat gabungan untuk agregat maksimum 10 mm (Lihat Tabel 2.33 dan Gambar 2.18). Berikut hasil analisa agregat gabungan tersedia pada (Tabel 3.8) dan (Gambar 3.11).

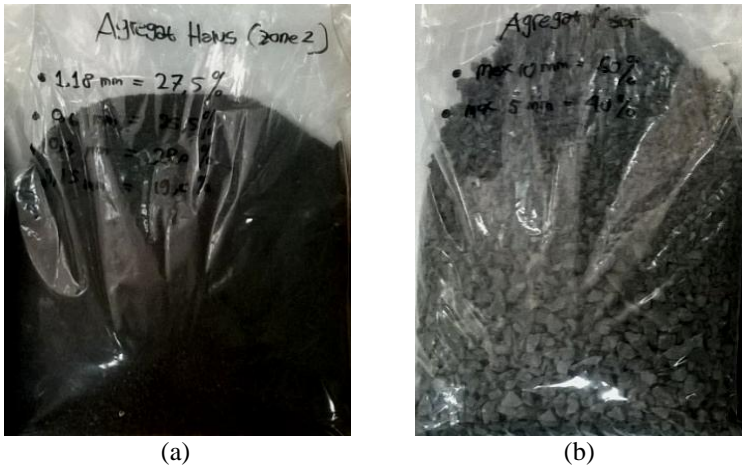
**Tabel 3. 8** Tabel hasil Analisa Agregat Gabungan Pasir Lumajang dan Batu Pecah Pasuruan

Lubang Ayakan mm	Ag. Halus E%	Ag.Kasar E%	Agregat Gabungan (%)		E Tertahan (%)	E Lolos (%)
			Agregat Halus	Agregat Kasar		
			40%	60%		
37.50	0	0	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00	0	0	0.00	0.00	0.00	100.00
9.50	0	0	0.00	0.00	0.00	100.00
4.75	0	60.00	0.00	36.00	36.00	64.00
2.36	12.50	100.00	5.00	60.00	65.00	35.00
1.18	27.50	100.00	11.00	60.00	71.00	29.00
0.60	53.00	100.00	21.20	60.00	81.20	18.80
0.30	81.00	100.00	32.40	60.00	92.40	7.60
0.15	95.00	100.00	38.00	60.00	98.00	2.00
0.00	100.00	100.00	40.00	60.00	100.00	0.00
<b>Jumlah:</b>					543.60	
<b>Modulus Kehalusan Agregat Gabungan:</b>					5.436	

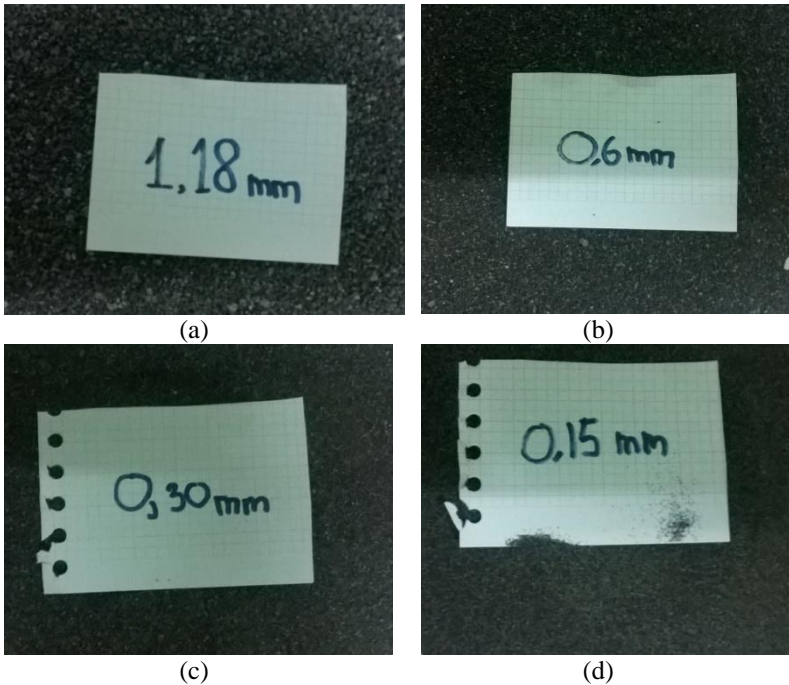




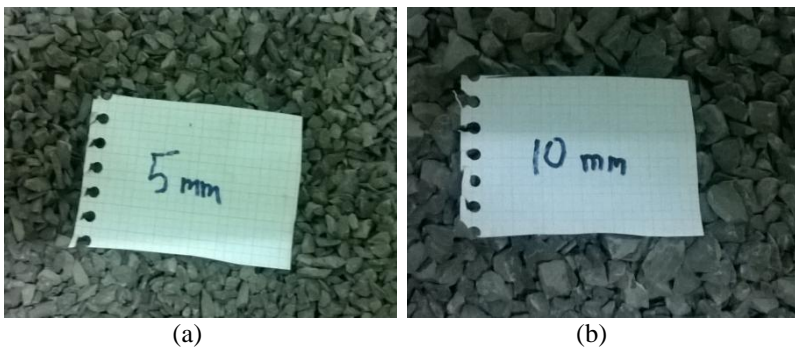
**Gambar 3. 11** Grafik Gradasi Agregat Gabungan Halus Pasir Lumajang dan Batu Pecah Pasuruan dengan hasil komposisi 40% Agregat Halus dan 60% Agregat Kasar



**Gambar 3. 12** Preparasi Agregat: (a) Agregat Halus Diatur % Kadar Setiap Ukuran Butirannya Agar Memenuhi Zona 2, (b) Agregat Kasar Dibuat Berukuran 5 – 10 mm melalui proses Crushing untuk dapat digunakan dalam pembuatan beton dengan cetakan kubus  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$



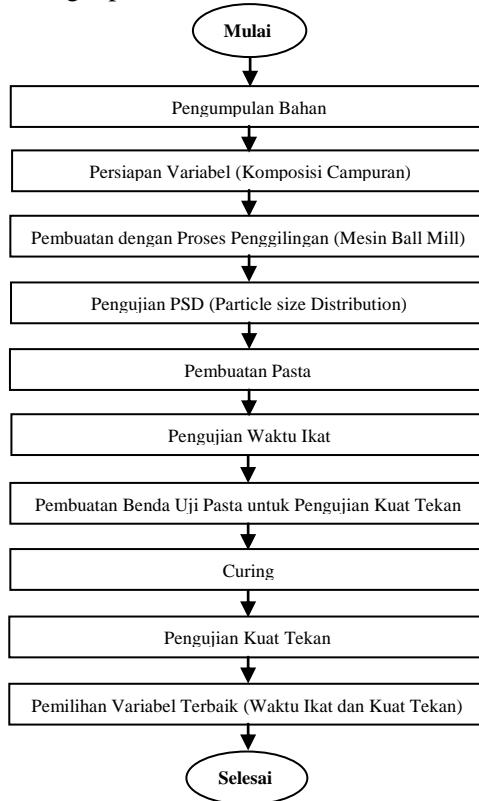
**Gambar 3. 13** Ukuran Butiran Agregat Halus yang Digunakan untuk Memenuhi Zona 2: (a) 1,18 mm (27,5%); (b) 0,6 mm (25,5%); (c) 0,3 mm (28,0%); (d) 0,15 mm (19,0%)



**Gambar 3. 14** Kombinasi Ukuran Butir Agregat Kasar yang Digunakan: (a) 5 mm (40%), (b) 10 mm (60%)

### 3.2.2 Pembuatan dan Pengujian Semen Geopolimer

Berikut merupakan rincian proses pembuatan dan pengujian semen geopolimer:



**Gambar 3. 15** Diagram Alir Proses Pembuatan dan Pengujian Semen Geopolimer

### 3.2.2.1 Pengumpulan Bahan

Bahan-bahan yang digunakan ialah bahan penyusun kecuali agregat seperti yang telah disebutkan pada sub-bab 3.2.1 beserta spesifikasinya.

### 3.2.2.2 Persiapan Variabel (Komposisi Campuran)

Variabel yang digunakan dalam penelitian semen dan pasta geopolimer ini ialah seperti pada (Tabel 3.9) berikut:

**Tabel 3. 9** Variabel Komposisi Campuran Semen Geopolimer

No.	Kode Variabel	Parameter Semen		Parameter Pasta
		FA : Aktivator	NaOH : $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Air : Semen
1	V1	85 : 15	1 : 2,5	0,165
2	V2	82,5 : 17,5	1 : 2,5	0,159
3	V3	80 : 20	1 : 2,5	0,154

\* Rasio Air terhadap Semen didapatkan melalui hasil trial (kuantitatif dan kualitatif) workabilitas

Kisaran nilai pada variabel tersebut dibuat berdasarkan atau mempertimbangkan hasil tinjauan pustaka (lihat sub-bab 2.5 Tabel 2.31) dan disesuaikan melalui trial-trial kecil sebagai berikut:

- Rasio Fly Ash dengan Aktivator

Awalnya, kisaran nilai perbandingan yang digunakan ialah: 85:15 (V1); 80:20 (V2); 75:25 (V3); 70:30 (V4); yang sesuai dengan tinjauan pustaka. Dalam hal perbandingan Fly Ash dengan aktivator, variabel V3 dan V4 terseleksi (Lihat Gambar 3.16 dan 3.17), karena setelah dilakukan trial pembuatan pasta, variabel tersebut menyisahkan banyak aktivator (Sodium Silikat Pentahidrat) yang tidak bereaksi (tidak ekonomis). Kemudian, jika ditinjau dari segi performa kuat tekan pun tidak memiliki kenaikan angka yang signifikan (Lihat Tabel 3.10).



**Gambar 3. 16** Benda Uji Pasta Semen Geopolimer Kondisi Keras dengan Variabel Awal: 85:15 (V1), 80:20 (V2), 75:25 (V3), 70 : 30 (V4)



**Gambar 3. 17** Variabel Awal 75:25 (V3) dan 70:30 (V4) dengan konten aktivator yang tinggi menyisakan butiran aktivator (Sodium Silikat Pentahidrat) yang tidak bereaksi

**Tabel 3. 10** Hasil Pengujian Kuat Tekan Trial Variabel Awal Pasta Semen Geopolimer

No	Kode Variabel	P Max (Kg)	A (cm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	V1	600	25	24,0
2	V2	630	25	25,2
3	V3	665	25	26,6
4	V4	700	25	28,0

- Rasio NaOH terhadap  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

Rasio NaOH terhadap  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan nilai 1:2,73 merupakan rasio yang disarankan oleh penelitian sebelumnya yang telah disebutkan pada tinjauan pustaka. Digunakan rasio 1:2,5 (mengacu perbandingan metode basah) karena mempertimbangkan trial sebelumnya yaitu pada trial rasio Fly Ash : Aktivator dan juga analisa harga aktivator seperti pada (Tabel 3.11) berikut:

**Tabel 3. 11** Analisa Harga Perbandingan Kombinasi Aktivator NaOH terhadap  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$

No	NaOH : $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Harga NaOH per Kg	Harga $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ per Kg	Total Harga per Kg
1	1 : 2,73	Rp. 10.000	Rp. 17.500	Rp. 15.489,28
2	1 : 2,50			Rp. 15.357,14

- Rasio Air dibanding Semen Geopolimer

Rasio yang disarankan pada penelitian sebelumnya atau yang telah disebutkan pada tinjauan pustaka memiliki nilai kisaran optimum 0,17 – 0,19. Namun, untuk mencegah terjadinya *bleeding*, maka dilakukan trial kecil untuk mengetahui kebutuhan air yang cukup untuk mengerjakan suatu pasta.

Melalui hasil trial dengan metode mencari kadar air maksimum hingga semen geopolimer jenuh, seperti pada (Gambar 3.18) menghasilkan rasio air terhadap semen geopolimer dengan nilai: 0,165 (V1); 0,159 (V2); 0,154 (V3); selengkapnya dapat dilihat pada (Tabel 3.12).



(a) Menyiapkan menimbang berat semen geopolimer dalam suatu wadah kecil (tutup botol air mineral)



(b) Meneteskan air dengan pipet hingga sampel jenuh air



(c) menimbang berat sampel yang berisi: semen geopolimer, wadah dan air

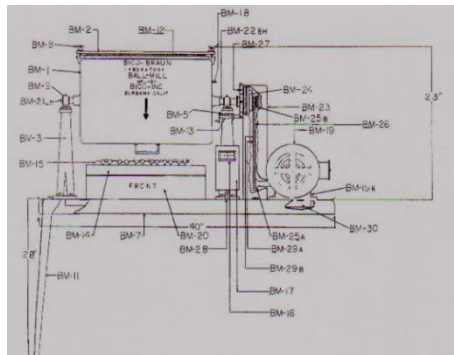
**Gambar 3. 18** Trial Mengetahui Rasio Air Terhadap Semen Geopolimer yang Aktual Terjadi

**Tabel 3. 12** Rasio Air Terhadap Semen Geopolimer yang Terjadi dalam Suatu Campuran Pasta

Variabel	W. Tutup	W. Tutup + Sampel	W. Tutup + Sampel + Air	FAS terjadi
V1	1,8	11,7	13,33	0.165
V2	1,8	11,7	13,27	0.159
V3	1,8	11,7	13,22	0.154

### 3.2.2.3 Pembuatan dengan Proses Penggilingan (Mesin Ball Mill)

Mesin ball mill yang digunakan untuk penggilingan semen skala lab memiliki spesifikasi dimensi 12" x 12" inci, dengan bola penghancur sebanyak 285 buah dengan berat total 44,5 lb. Mesin ini Produk dari BICO Company USA. Proses penggilingan dilakukan di Workshop Semen PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, Gresik, Jawa Timur, Indonesia.



**Gambar 3. 19** Sketsa Mesin Ball Mill Skala Lab yang Digunakan dalam Penelitian Ini (Produk BICO Company USA)



**Gambar 3. 20** Wujud Mesin Ball Mill yang Digunakan: (a) Tampak Luar Mesin, (b) 285 Bola Penggilas dengan Berat Total 44,5 lb



Langkah-langkah pembuatan semen geopolimer skala lab dengan mesin penggiling ball mill :

1. Menyiapkan material penyusun dengan massa total 3 Kg, dikarenakan kapasitas standar ball mill ini optimal menggiling dengan massa material 3 Kg.



**Gambar 3. 21** Menyiapkan Material Penyusun Semen Geopolimer dengan Massa Total 3 Kg

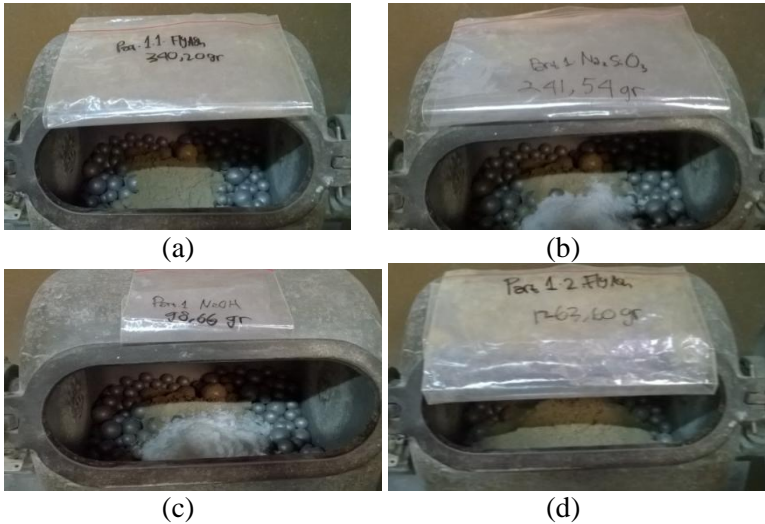
2. Menyiapkan dan memastikan tabung ball mill termasuk bola-bola penggilas dalam kondisi kering dan tidak terkontaminasi material lainnya.



**Gambar 3. 22** Memastikan tabung dan Bola dalam Keadaan Kering dan Tidak Terkontaminasi Material Lain

3. Memasukan material penyusun, dengan urutan material: Fly Ash (1/2 Bagian) → Aktivator → Fly Ash (1/2 Bagian).

Aktivator terselubungi oleh Fly Ash ditujukan agar aktivator tidak terhidroskopis secara langsung terkontak dengan bola baja, sisi-sisi tabung, serta udara.



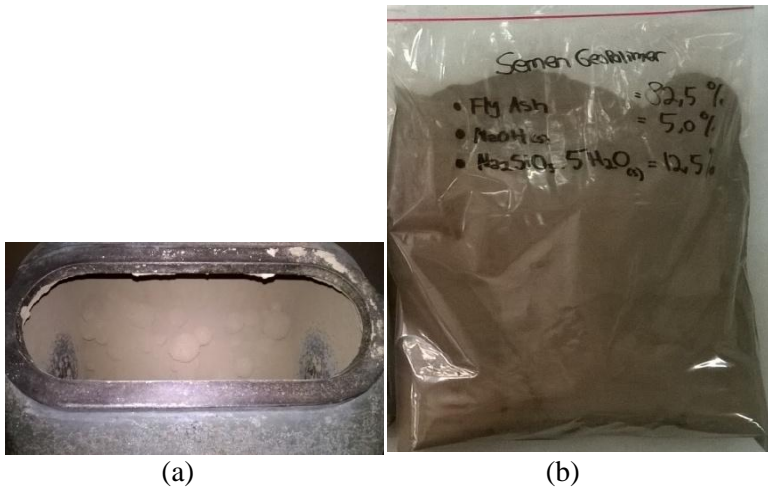
**Gambar 3. 23** Urutan Memasukan Material: (a) Fly Ash (1/2), (b) Sodium Hidroksida (c) Sodium Silikat Pentahidrat, (d) Fly Ash (1/2)

4. Menutup tabung dan menjalankan mesin ball mill dengan durasi 10 menit.



**Gambar 3. 24** (a) Menutup Tabung Ball Mill, (b) Mesin Ball Mill Mulai Penggilingan dengan Durasi 10 Menit

5. Membuka tabung, mengambil sampel, dan mengemas sampel



**Gambar 3. 25** (a) Tabung Ball Mill Dibuka, (b) Semen Geopolimer Dikemas Dalam Plastik Kedap Udara

6. Membersihkan tabung dan bola ball mill dengan menggiling pasir silika

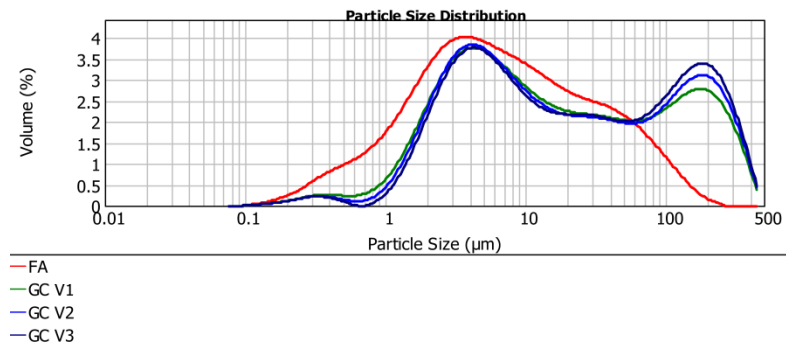


**Gambar 3. 26** (a) Pasir Silika Dimasukan Ke Dalam Tabung Ball Mill, (b) Wujud Fisik Pasir Silika

7. Untuk pembuatan berikutnya, ulangi urutan 1 hingga 6.

### 3.2.2.4 Pengujian PSD (*Particle Size Distribution*)

Pengujian PSD dilakukan untuk mengetahui karakteristik sebaran butiran semen geopolimer masing-masing variabel yang telah digiling. Kemudian, data hasil pengujian PSD ini akan dijadikan pedoman untuk pembuatan semen geopolimer variabel terbaik untuk berikutnya digunakan pada beton semen geopolimer. Secara singkat hasil PSD dapat dilihat pada (Gambar 3.27) berikut:



**Gambar 3. 27** Grafik PSD pada: Fly Ash, dan Variabel 1 – 4 Semen Geopolimer Menggunakan Instrumen Malvern MS (Mastersizer) 2000 di Lab PSD PT. Semen Indonesia (persero) Tbk

### 3.2.2.5 Pengujian Waktu Ikut

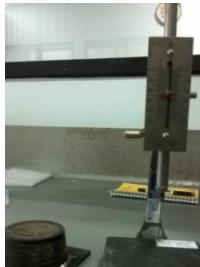
Pengujian waktu ikat semen geopolimer mengacu pada ASTM C-91-82 (lihat sub-bab 2.7.2 poin I) dengan modifikasi pada materialnya, yaitu mengganti semen portland dengan semen geopolimer. Berikut merupakan langkah-langkah pengujianya:

1. Menyiapkan semen geopolimer dengan berat 300 gram



**Gambar 3. 28** Semen Geopolimer Sebanyak 300 gr Disiapkan

2. Menyiapkan alat vicat (diameter jarum  $1 \pm 0,5$  mm) dan cetakan benda uji



**Gambar 3. 29** Alat Vicat dan Cetakan Benda Uji Disiapkan

3. Menyiapkan adonan pasta dengan menuangkan air ke dalam semen geopolimer dengan konten sesuai rasio air semen tiap variabel (lihat Tabel 3.12)



**Gambar 3. 30** Membuat Adonan Pasta Semen Geopolimer Untuk Benda Uji Vicat

4. Mengaduk hingga homogen ( $\pm 60$  detik)



**Gambar 3. 31** Adonan Diaduk Hingga Homogen

5. Memasukan kedalam cetakan pengujian vicat



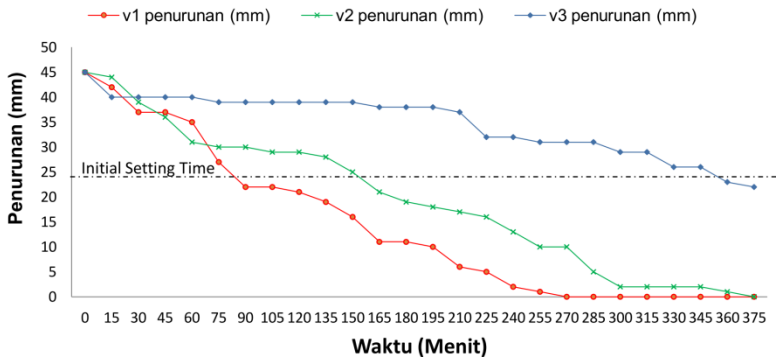
**Gambar 3. 32** Adonan Pasta Dimasukan Ke Dalam Cetakan

6. Mencatat penurunan jarum vicat setiap 15 menit



**Gambar 3. 33** Mencatat Penurunan Jarum Vicat Setiap 15 Menit

7. Mencatat waktu ikat awal terjadi apabila penurunan jarum vicat mencapai angka 25 mm



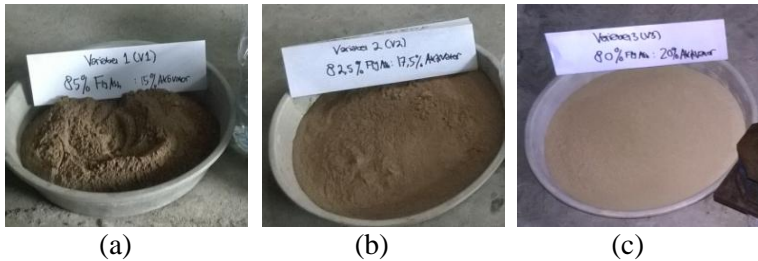
**Gambar 3. 34** Mencatat Penurunan Jarum Vicat dan Menemukan Nilai Waktu Ikat Awal Semen Geopolimer Apabila Penurunan Jarum Mencapai Angka 25 mm

### 3.2.2.6 Pembuatan Benda Uji Pasta untuk Pengujian Kuat Tekan

Pembuatan benda uji pasta memakai komposisi yang telah ditentukan dalam variabel penelitian (lihat Tabel 3.9).

Berikut merupakan langkah-langkah pembuatan pasta semen geopolimer untuk pembuatan benda uji kuat tekan:

1. Menyiapkan semen geopolimer sesuai volume kebutuhan benda uji untuk umur 3, 7, dan 14 hari dengan banyak benda uji 2 buah per variabel (Total 6 benda uji per variabel).



**Gambar 3. 35** Masing-Masing Variabel Semen Geopolimer Disiapkan untuk Pembuatan Benda Uji Pasta Kuat Tekan

2. Menyiapkan alat pengaduk dan cetakan benda uji kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm



3. Memasukkan semen geopolimer kedalam wadah pengaduk





**Gambar 3. 36** Memasukan Semen Geopolimer Ke Dalam Wadah Pengaduk

4. Memasukan air sesuai dengan rasio air terhadap semen geopolimer pada ketentuan variabel (lihat Tabel 3.12)



**Gambar 3. 37** Memasukan Air Sesuai Takaran Rasio Air Terhadap Semen Masing-Masing Variabel yang Telah Ditentukan

5. Mengaduk hingga homogen ( $\pm 1$  menit) untuk volume 6 cetakan kubus tersebut



**Gambar 3. 38** Mengaduk Adonan Pasta Segar Semen Geopolimer Hingga Homogen

6. Menuangkan adonan pasta segar semen geopolimer ke dalam cetakan kubus



**Gambar 3. 39** (a) Adonan Pasta Semen Geopolimer Dituang Ke Dalam Benda Uji Kubus, (b) Cetakan Kubus Setelah Terisi Penuh Oleh Pasta Semen Geopolimer

### 3.2.2.7 Curing

Setelah pasta semen geopolimer berumur 1 (satu) hari, benda uji dilepas dari bekisting kubus. Setelah itu, dirawat (curing) dengan metode *Polythene Curing*, yaitu melapisi membran plastik untuk mencegah pergerakan uap air dari benda uji. Kemudian disimpan pada suhu ruang. Curing dengan suhu ruang dipilih, karena akan diaplikasikan secara luas seperti pada konstruksi insitu dan precast tanpa proses penambahan temperatur tinggi untuk teknologi steam.



**Gambar 3. 40** (a) Benda Uji Pasta Umur 1 (satu) Hari Setelah Dilepas Dari Bekisting, (b) Curing dengan Metode Pelapisan Membran Plastik pada Suhu Ruang

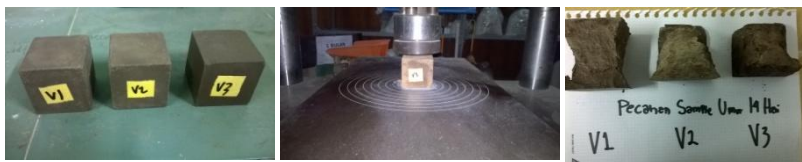
### 3.2.2.8 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7 dan 14 hari. Setiap umur, benda uji yang dibutuhkan sebanyak 2 (dua) buah per variabel. Menggunakan instrumen mesin pengujian kuat tekan produksi Tinius Olsen Company (Seri Manometer atau non digital) dengan kapasitas 200.000 Kg dengan ketelitian bacaan 10 – 50 Kg sehingga dapat membaca nilai kuat tekan yang kecil. Pengujian kuat tekan dilakukan di ruang uji kuat tekan Gedung Pusat Penelitian Semen (PPS) PT. Semen Indonesia (persero) Tbk.



**Gambar 3. 41** Mesin Pengujian Kuat Tekan Produksi Tinius Olsen Company

Langkah-langkah pengujian dan pencatatan nilai kuat tekan seperti yang diatur pada ASTM C 39/C39M-05 (lihat sub-bab 2.7.2 poin II).



(a)

(b)

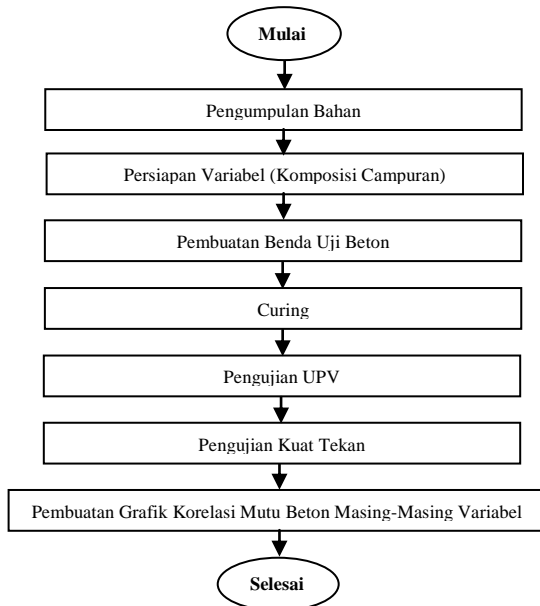
(c)

**Gambar 3. 42** (a) Benda Uji Disiapkan, (b) Benda Uji Dalam Proses Pengujian Kuat Tekan, (c) Benda Uji Setelah Pengujian Kuat Tekan

### 3.2.2.9 Pemilihan Variabel Terbaik (Waktu Ikat dan Kuat Tekan)

Dari hasil pengujian waktu ikat dan kuat tekan, maka variabel terbaik semen geopolimer akan dipakai dalam pembuatan beton semen geopolimer. Karena nantinya, di beton semen geopolimer variabel yang digunakan ialah konten semen geopolimer.

### 3.2.3 Pembuatan dan Pengujian Beton Semen Geopolimer



**Gambar 3. 43** Diagram Alir Pembuatan dan Pengujian Beton Semen Geopolimer

### 3.2.3.1 Pengumpulan Bahan

Bahan-bahan yang digunakan ialah semen geopolimer (dengan komposisi variabel terbaik) dan agregat yang spesifikasinya dapat dilihat pada sub-bab 3.2.1.

### 3.2.3.2 Persiapan Variabel (Komposisi Campuran)

Variabel yang digunakan dalam beton semen geopolimer ini ialah seperti pada (Tabel 3.13 dan 3.14) berikut:

**Tabel 3. 13** Variabel Penelitian Beton Semen Geopolimer (Prosesntase Komposisi)

No	Kode Variabel	Konten Semen (%)	Konten Agregat (%)	Agregat	
				Kasar (%)	Halus (%)
1	V1	15	85	60	40
2	V2	20	80	60	40
3	V3	30	70	60	40

**Tabel 3. 14** Komposisi Desain Campuran Beton Geopolimer Masing-Masing Variabel

No	Kode Variabel	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	Semen (Kg/m <sup>3</sup> )	Agregat Kasar (Kg/m <sup>3</sup> )	Agregat Halus (Kg/m <sup>3</sup> )
1	V1	2400	360	1224	816
2	V2	2400	480	1152	768
3	V3	2400	720	1008	672

**Ket:** Rasio air terhadap semen (w/c) untuk awal perencanaan menggunakan nilai rasio w/c pasta semen geopolimer variabel terbaik

Variabel yang digunakan memiliki kisaran nilai yang mengacu pada penelitian sebelumnya, yang telah tertulis pada tinjauan pustaka TAT ini. Berikut merupakan rinciannya:

- Penentuan Nilai Rencana Densitas Beton

Densitas beton untuk seluruh variabel dibuat sama nilainya, yaitu direncanakan 2400 Kg/m<sup>3</sup>.

- Penentuan Nilai Konten Semen

Konten semen dibuat variasi sesuai levelnya, yaitu: V1 = 15% atau  $360 \text{ Kg/m}^3$  (Level Menengah); V2 = 20% atau  $480 \text{ Kg/m}^3$  (Level Tinggi); V3 = 30% atau  $720 \text{ Kg/m}^3$  (Level Sangat Tinggi). Nilai tersebut mengacu pada (Tabel 2.32)

- Penentuan Prosentase Agregat Kasar dan Halus

Penentuan prosentase pembagian prosesntase agregat menggunakan metode grafik SNI 2834-2000, untuk lebih jelasnya lihat pada (sub-bab 2.6 poin III). Dan hasilnya yaitu didapatkan 60% agregat kasar dan 40% agregat halus lihat pada (sub-bab 3.2.1.3).

- Penentuan Rasio Air Terhadap Semen Geopolimer

Penentuan rasio air terhadap semen (w/c) berdasarkan rasio w/c dari semen geopolimer yang menjadi variabel terbaik. Selanjutnya disesuaikan dengan penambahan air untuk agregat (karena faktor kadar air dan penyerapan).

### 3.2.3.3 Pembuatan Benda Uji Beton

Pembuatan benda uji pasta memakai komposisi yang telah ditentukan dalam variabel penelitian (lihat Tabel3.14). Berikut merupakan langkah-langkah pembuatan beton semen geopolimer:

1. Menyiapkan semen geopolimer, agregat, dan air sesuai volume banyaknya benda uji. Per variabel dalam pengujian kuat tekan dibutuhkan 3 benda uji. Umur pengujianya ialah: 3, 7, 14, dan 28 hari. Sehingga total benda uji sebanyak 12 benda uji pervariabel. Benda uji yang digunakan ialah kubus  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ .



**Gambar 3. 44** Material Penyusun Beton Semen Geopolimer, Dari Kanan: Semen Geopolimer, Agregat Halus, dan Agregat Kasar

2. Menyiapkan alat pengaduk dan cetakan kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm



**Gambar 3. 45** Menyiapkan Alat Pengaduk (Hand Mixer dan Wadah) serta Cetakan Kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm

3. Memasukan semen geopolimer kedalam wadah pengaduk



**Gambar 3. 46** Memasukan Semen Geopolimer

4. Memasukan air sesuai dengan rasio air terhadap semen geopolimer (lihat Tabel 3.14) dan telah dikoreksi terhadap kadr air dan penyerapan air agregat sesuai pada (persamaan 2.14)



**Gambar 3. 47** Memasukan Air Sesuai Rasio Air terhadap Semen Geopolimer yang Telah Ditentukan

5. Mengaduk hingga homogen ( $\pm 1$  Menit) untuk volume 12 benda uji



**Gambar 3. 48** Adonan Semen geopolimer dan Air (pasta) yang Telah Ditambahkan Hingga Homogen

6. Memasukan agregat kasar, lalu di ikuti agregat halus



(a)



(b)

**Gambar 3. 49** (a) Agregat Kasar masuk, (b) diikuti Agregat Halus



7. Mengaduk adonan beton hingga homogen ( $\pm 3$  menit) untuk volume pengecoran 12 benda uji kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm



**Gambar 3. 50** (a) Pengadukan Adonan Beton Semen Geopolimer Segar, (B) Beton Geopolimer Segar yang Telah Diaduk Hingga Homogen

8. Memasukkan adonan beton semen geopolimer kondisi segar ke cetakan kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm



**Gambar 3. 51** Adonan beton segar dicetak kedalam benda uji kubus 5 cm x 5 cm x 5 cm

### 3.2.3.4 Curing

Setelah beton semen geopolimer berumur 1 (satu) hari, benda uji dilepas dari bekisting kubus. Setelah itu, dirawat (curing) dengan metode *Polythene Curing*, yaitu melapisi membran plastik untuk mencegah pergerakan uap air dari benda uji. Kemudian disimpan pada suhu ruang. Curing dengan suhu ruang dipilih, karena akan diaplikasikan secara luas seperti pada konstruksi insitu dan precast tanpa proses penambahan temperature tinggi untuk teknologi steam.



**Gambar 3. 52** Proses Curing Beton Semen Geopolimer dengan Metode *Polythene Curing* dalam Suhu Ruang

### 3.2.3.5 Pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*)

Seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.7.2 poin III, bahwa pengujian UPV adalah metode untuk memperkirakan kekuatan beton yang didasarkan pada hubungan kecepatan gelombang pulsa ultrasonic melalui media beton. Instrument UPV yang digunakan ialah produk Proceq Company. Pengujian ini dilakukan di Lab Material dan Struktur Gedung Departemen Teknik Infrastruktur Sipil Fakultas Vokasi ITS, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia. Berikut merupakan langkah-langkah pengujian UPV:

1. Menyiapkan alat pengujian UPV dan benda uji beton semen geopolimer yang berumur 28 hari



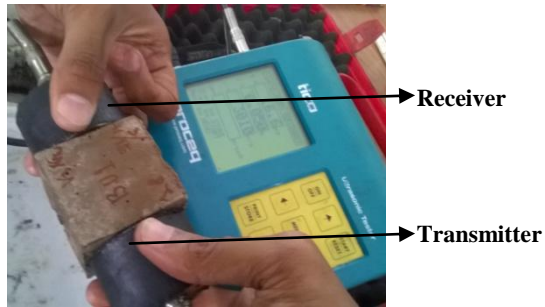
**Gambar 3. 53** Instrumen UPV (Produk Proceq Company) dan Benda Uji Beton Semen Geopolimer Umur 28 Hari

2. Mengatur instrument UPV dibagian menu “Distance” ke- angka 0,05 m atau 5 cm sesuai dimensi benda uji



**Gambar 3. 54** Distance (jarak) pada Instrument UPV Diatur Sesuai Dimensi Benda Uji

3. Menjalankan instrumen dengan menekan menu “start” pada instrumen untuk memancarkan gelombang melalui transmitter ke receiver yang mengapit benda uji.



**Gambar 3. 55** Proses Pemancaran Gelombang UPV pada Benda Uji Beton Semen Geopolimer

4. Mencatat nilai  $t$  (time),  $l$  (length), dan  $v$  (velocity). Nilai “ $v$ ” inilah yang disebut nilai hasil pengujian UPV.

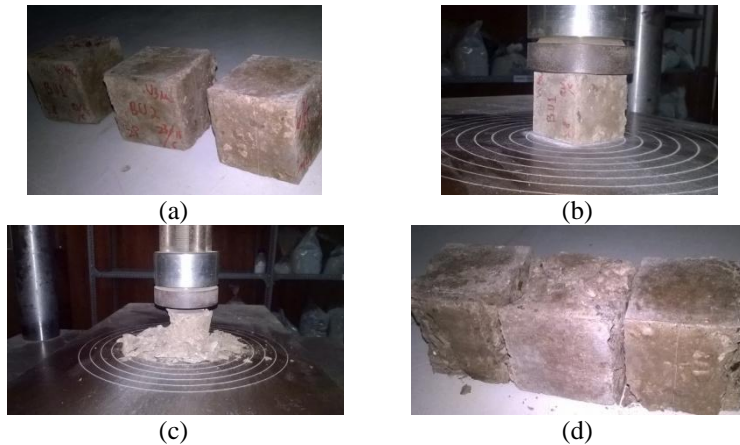


**Gambar 3. 56** Output Pengujian UPV terdiri dari: Waktu Rambat ( $t$ ), Jarak Rambat ( $l$ ), Kecepatan Rambat Gelombang UPV ( $v$ )

### 3.2.3.6 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton semen geopolimer dilakukan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari. Masing-masing variabel memerlukan 3 (tiga) benda uji setiap umurnya. Instrumen atau

mesing pengujian kuat tekan yang digunakan sama ketika menguji kuat tekan pasta (lihat sub-bab 3.2.2.8). Langkah-langkah pengujian dan pencatatan nilai kuat tekan seperti yang diatur pada ASTM C 39/C39M-05 (lihat sub-bab 2.7.2 poin II).



**Gambar 3. 57** Proses Pengujian Kuat Tekan Beton Semen Geopolimer:  
 (a) Menyiapkan Benda Uji, (b) Proses Pengujian, (c) Beton Dalam Keadaan Ultimate, (d) Beton Setelah Diuji Kuat Tekan

### 3.2.3.7 Pembuatan Grafik Korelasi Mutu Beton

Setelah mendapatkan nilai kuat tekan beton semen geopolimer dari masing-masing variabel untuk umur 3, 7, 14, dan 28 maka selanjutnya ialah menggambarkan pola grafik korelasi kuat tekan terhadap umur pengujian. Hal ini nantinya dapat menjadi acuan korelasi mutu beton semen geopolimer untuk penelitian selanjutnya.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut merupakan hasil dan pembahasan dari seluruh kegiatan penelitian, mulai dari: spesifikasi material penyusun, performa semen dan pasta semen geopolimer, dan performa beton semen geopolimer. Serta, ditambahkan juga pembahasan tentang analisa harga bahan produksi beton semen geopolimer dan potensi keunggulan beton semen geopolimer. Berikut rinciannya:

### 4.1 Spesifikasi Material Penyusun

#### 4.1.1 Fly Ash

##### 4.1.1.1 Pengujian XRF dan LOI

Hasil pengujian XRF dan LOI Fly Ash PLTU PT. IPMOMI yang digunakan pada penelitian ini, dapat dilihat secara detail pada sub- bab 3.2.1.1. Berikut pembahasan tentang kategori fly ash yang digunakan pada penelitian ini jika ditinjau dari literatur ASTM C618-12.

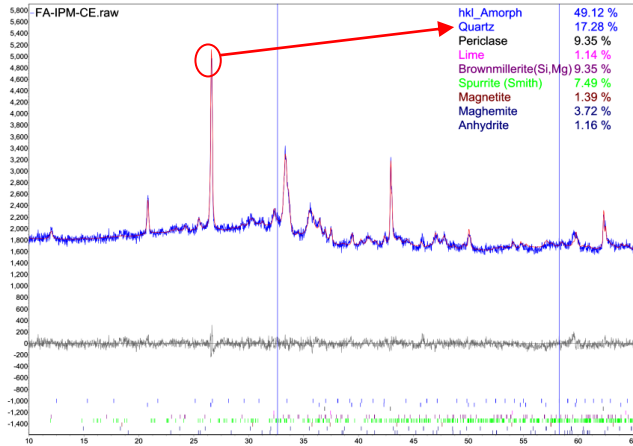
**Tabel 4. 1** Hasil Pengujian XRF Fly Ash yang Digunakan dengan Parameter ASTM C618-12

No.	Parameter	Nilai
1	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % Aktiv	36,118%
2	Hilang Pijar / LOI, %	0,686
3	CaO, % Aktiv	15,330

Parameter 1, 2 dan 3 menyimpulkan bahwa Fly Ash yang digunakan dalam penelitian ini termasuk Tipe C (*High Calcium Fly Ash*), dengan nilai SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 70%; LOI Maks. 6%; dan CaO > 15% (lihat sub-bab 2.2.3).

#### 4.1.1.2 Pengujian XRD

Hasil pengujian XRD Fly Ash yang digunakan dalam penelitian ini ialah sebagai berikut:



**Gambar 4. 1** Pola XRD Fly Ash PT. IPMOMI yang Digunakan pada Penelitian ini, mineral yang terkandung ialah: hkl\_amorph, Quartz, Periclase, Lime, Brownmillerite, Spurrite, Magnetite, Maghemite, dan Anhydrite

**Tabel 4. 2** Kandungan Mineral Hasil Pengujian XRD Terhadap Fly Ash yang Digunakan

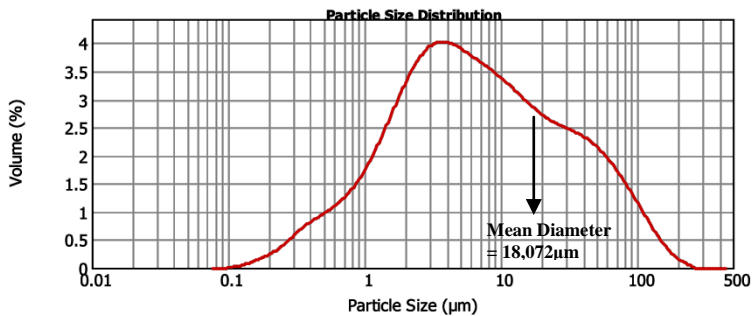
Mineral	%	Keterangan
Hkl_Amorph	49,12	Amorph (Aktif)
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	17,28	Kristal (T. Aktiv)
Periclase (MgO)	9,35	Kristal (Aktif)
Lime (CaO)	1,14	Kristal (Aktif)
Brownmillerite (Si,Mg)	9,35	Kristal (T. Aktiv)
Spurrite (Ca <sub>5</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	7,49	Kristal (Aktif)
Magnetite (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	1,39	Kristal (T. Aktiv)
Maghemite (γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,72	Kristal (T. Aktiv)
Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	1,16	Kristal (Aktif)



Dengan Informasi hasil XRD diatas, mendukung untuk mendapatkan informasi tentang kategori Fly Ash tersebut, bahwa Fly Ash PT. IPMOMI yang digunakan dalam penelitian ini termasuk Tipe C. Hal tersebut dikarenakan, didapatkan data kandungan mineral: Quartz, Periclase, Anhydrite, dan lime seperti pada literatur Tishmack, 1999 yang tercantum juga pada tinjauan pustaka TAT ini (lihat sub-bab 2.7.1 poin III).

#### 4.1.1.3 Pengujian PSD

Hasil pengujian PSD (Particle Size Distribution) berupa grafik dan tabel hasil *laser diffraction analysis* terhadap Fly Ash PT. IPMOMI yang digunakan pada penelitian ini ialah sebagai berikut:



**Gambar 4. 2** Size Distribution Plot Fly Ash PT. IPMOMI yang Digunakan Pada Penelitian Ini

**Tabel 4. 3** Data Hasil *Laser Diffraction Analysis* Pada Pengujian PSD Fly Ash PT. IPMOMI yang Digunakan dalam Penelitian ini

Parameter	Nilai
d (0,1)	1,004 µm
d (0,5)	6,263 µm
d (0,9)	51,991 µm
Surface Weighted Mean D[3,2]	2,374 µm
Volume Weighted Mean D[4,3]	18,072 µm
Partikel yang Lebih Besar dari 45 µm dalam suatu volume	24%
Partikel yang Lebih Besar dari 10 µm dalam suatu volume	76%

## 4.1.2 Aktivator

### 4.1.2.1 Tipikal Spesifikasi Kandungan Kimia NaOH

Pada penelitian ini digunakan NaOH dari PT.Tjiwi Kimia Surabaya. Berikut merupakan tipikal spesifikasi kimia dari NaOH flake 98%:

**Tabel 4. 4** Tipikal Komposisi Kimia pada Sodium Hidroksida Flake 98% (Cristal Company, 2016)

<b>Parameter</b>	<b>Nilai %</b>
Sodium Hidroksida (NaOH)	98 min
Residual Water (H <sub>2</sub> O)	1 max. (ppm)
Sodium Carbonate (NaCO <sub>3</sub> )	0,5 max. (ppm)
Chloride (NaCl)	150 max. (ppm)
Iron (Fe)	5 max. (ppm)
Nickel (Ni)	5 max. (ppm)

### 4.1.2.2 Tipikal Spesifikasi Kandungan Kimia Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O

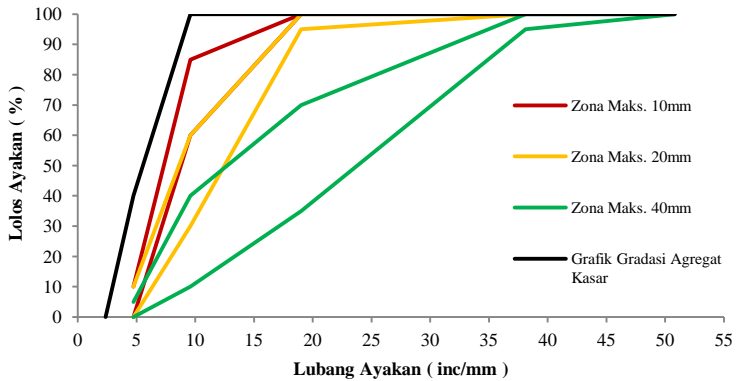
**Tabel 4. 5** Tipikal Komposisi Senyawa Kimia pada Sodium Silikat Pentahidrat (PQ Corporation, 2009)

<b>Oksida</b>	<b>Kadar %</b>
SiO <sub>2</sub>	28,5
Na <sub>2</sub> O	28,7
LOI, 800°C	43,0

### 4.1.3 Agregat

#### 4.1.3.1 Agregat Kasar

Berikut merupakan spesifikasi agregat kasar batu pecah Pasuruan yang digunakan dalam penelitian ini:



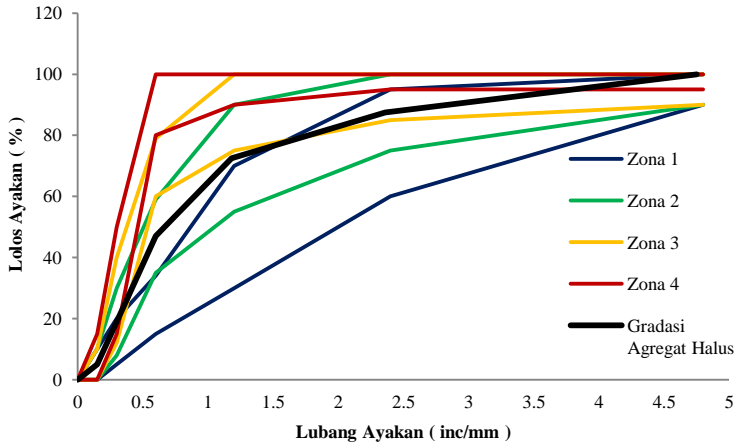
**Gambar 4. 3** Gradasi Agregat Kasar Batu Pecah Pasuruan Menunjukkan Hasil Zona Maks 10 mm

**Tabel 4. 6** Spesifikasi Agregat Kasar Batu Pecah Pasuruan maks. 10 mm yang Digunakan dalam Penelitian Ini

No	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian
1.	Analisa Gradasi Agregat Kasar (ASTM C136)	
	- Modulus Kehalusan (FM)	6,6
	- Zona (maks)	10 mm
2.	Kadar Air Agregat Kasar (ASTM C566)	1,15%
3.	Penyerapan Air Agregat Kasar (ASTM C127)	0,44%

#### 4.1.3.2 Agregat Halus

Berikut merupakan spesifikasi agregat halus pasir Lumajang yang digunakan dalam penelitian ini:



**Gambar 4. 4** Gradasi Agregat Halus Pasir Lumajang Menunjukkan Hasil Zona 2

**Tabel 4. 7** Spesifikasi Agregat Halus Pasir Lumajang yang Digunakan dalam Penelitian Ini

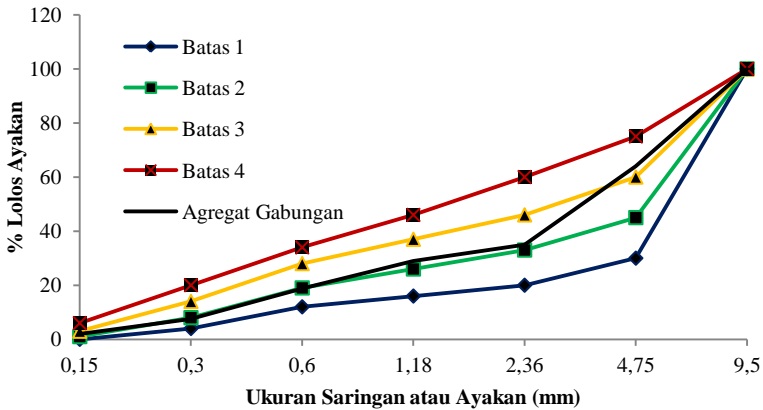
No	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian
1.	Analisa Gradasi Agregat Halus (ASTM C136)	
	- Modulus Kehalusan (FM)	3,69
	- Zona	2
2.	Kadar Air Agregat Halus (ASTM C566)	0,88%
3.	Penyerapan Air Agregat Halus (ASTM C128)	0,14%

#### 4.1.3.3 Agregat Gabungan

Berikut merupakan hasil analisa agregat gabungan antara batu pecah Pasuruan maks 10 mm dengan agregat halus pasir Lumajang:

**Tabel 4. 8** Analisa Agregat Gabungan Menggunakan Komposisi 60% Agregat Halus : 40% Agregat Kasar

Lubang Ayakan mm	Ag. Halus E%	Ag.Kasar E%	Agregat Gabungan (%)		E Tertahan (%)	E Lolos (%)
			Agregat Halus	Agregat Kasar		
			40%	60%		
<b>37.50</b>	0	0	0.00	0.00	0.00	100.00
<b>19.00</b>	0	0	0.00	0.00	0.00	100.00
<b>9.50</b>	0	0	0.00	0.00	0.00	100.00
<b>4.75</b>	0	60.00	0.00	36.00	36.00	64.00
<b>2.36</b>	12.50	100.00	5.00	60.00	65.00	35.00
<b>1.18</b>	27.50	100.00	11.00	60.00	71.00	29.00
<b>0.60</b>	53.00	100.00	21.20	60.00	81.20	18.80
<b>0.30</b>	81.00	100.00	32.40	60.00	92.40	7.60
<b>0.15</b>	95.00	100.00	38.00	60.00	98.00	2.00
<b>0.00</b>	100.00	100.00	40.00	60.00	100.00	0.00
<b>Jumlah:</b>					543.60	
<b>Modulus Kehalusan Agregat Gabungan:</b>					5.436	

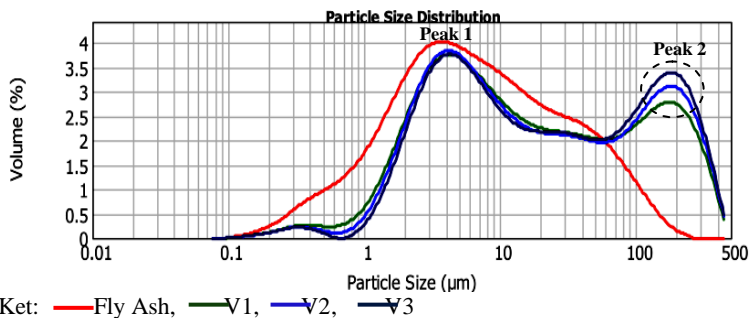


**Gambar 4.5** Grafik Agregat Gabungan untuk Ukuran Agregat Maks 10 mm dan Komposisi 60% Agregat Kasar : 40% Agregat Halus Memenuhi Syarat Grafik Zona Agregat Gabungan Tersebut

## 4.2 Performa Semen dan Pasta Semen Geopolimer

### 4.2.1 Hasil Pengujian PSD Semen Geopolimer

Berikut merupakan hasil pengujian PSD dari masing-masing variabel semen geopolimer:



**Gambar 4.6** Size Distribution Plot Masing-Masing Variabel Semen Geopolimer

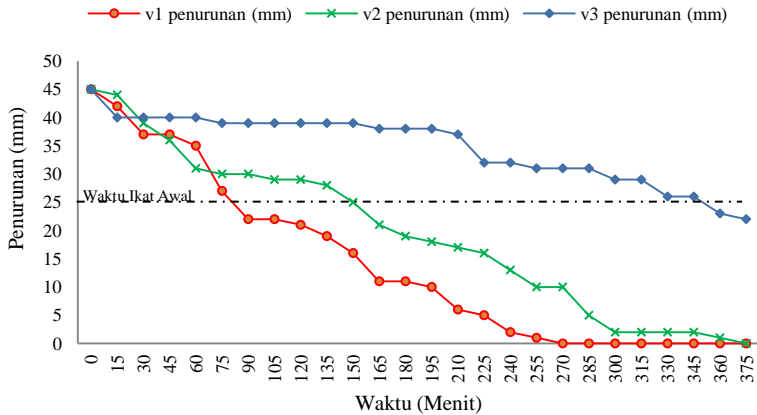
Tampak pada hasil pengujian PSD seluruh variabel semen geopolimer memiliki 2 Peak (Puncak). Peak 2 muncul dikarenakan semen geopolimer mengandung aktivator padat terutama Sodium Silikat Pentahidrat berwujud granular yang dalam proses penggilingan bersama-sama dengan Fly Ash dan Sodium Hidroksida tidak bisa menyamai butiran Fly Ash. Berikut merupakan hasil *laser diffraction analysis* PSD pada masing-masing variabel semen geopolimer:

Parameter	Nilai ( $\mu\text{m}$ )			
	Fly Ash	V1	V2	V3
d (0,1)	1,004	2,152	2,306	2,237
d (0,5)	6,263	13,145	14,152	13,893
d (0,9)	51,991	187,491	199,226	196,271
Surface Weighted Mean D[3,2]	2,374	4,579	4,898	4,740
Volume Weighted Mean D[4,3]	18,072	56,951	60,722	56,629

Dari hasil *laser diffraction analysis* pengujian PSD tersebut, menyimpulkan bahwa butiran semen geopolimer lebih besar 1,99 kali dari Fly Ash, kemudian semakin tinggi kadar aktivatornya maka semakin besar pula ukuran butiran semen geopolimer tersebut.

#### 4.2.2 Waktu Ikat Pasta

Berikut merupakan hasil pengujian waktu ikat pasta untuk masing-masing variabel semen geopolimer:



**Gambar 4. 7** Grafik Pengujian Waktu Ikut Pasta Seluruh Variabel Semen Geopolimer

**Tabel 4. 9** Hasil Waktu Ikut Awal Pasta Masing-Masing Variabel Semen Geopolimer

No.	Kode Variabel	Waktu Ikut Awal (Menit)
1.	V1	81
2.	V2	150
3.	V3	350

Dari hasil pengujian waktu ikat semen geopolimer tersebut, variabel yang memiliki waktu ikat paling cepat ialah V1, kemudian yang paling lama ialah V3. Sementara V2 berada di tengah-tengah waktu V1 dan V2. Hal ini menyimpulkan bahwa, semakin tinggi kandungan aktivator, maka semakin lambat pula waktu ikat awal yang dihasilkan. Begitu juga sebaliknya. Jika dibandingkan dengan waktu ikat pasta semen portland yang memiliki nilai 153 menit, maka V2 merupakan variabel dengan waktu ikat yang hamper sama dengan semen portland.

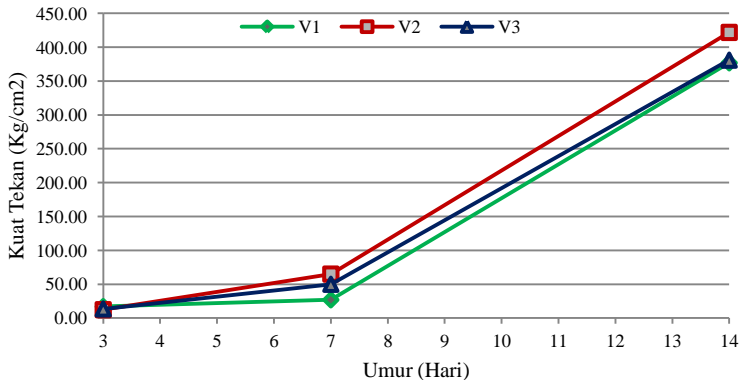


### 4.2.3 Kuat Tekan Pasta

Berikut merupakan hasil pengujian kuat tekan pasta seluruh variabel semen geopolimer pada umur 3, 7 dan 14 hari:

**Tabel 4. 10** Desain Campuran Pasta Semen Geopolimer Seluruh Variabel

Kode Variabel	Parameter Semen		Parameter Pasta
	FA : Aktivator	NaOH : Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O	Air : Semen
V1	85 : 15	1 : 2,5	0,165
V2	82,5 : 17,5	1 : 2,5	0,159
V3	80 : 20	1 : 2,5	0,154



**Gambar 4. 8** Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan Rata-Rata (Dari 2 Benda Uji Per-Pengujian) Pasta Seluruh Variabel Semen Geopolimer Umur 3, 7, dan 14 Hari

**Tabel 4. 11** Hasil Pengujian Kuat Tekan Pasta Seluruh Variabel Semen Geopolimer

No.	Kode Variabel	Kuat Tekan Rata-Rata (Kg/cm <sup>2</sup> )*		
		3 Hari	7 Hari	14 Hari
1.	V1	17,00	27,00	377,00
2.	V2	12,40	65,00	422,00
3.	V3	13,60	50,00	381,00

\* Kuat Tekan Rata-Rata dari 2 (dua) Benda Uji Per Umur Pengujian

Dari hasil pengujian kuat tekan pasta semen geopolimer tersebut, variabel dengan kuat tekan tertinggi ialah V2, kemudian disusul oleh V3, dan V1. Hal tersebut menyimpulkan bahwa, semakin tinggi kandungan aktivator, maka semakin tinggi pula mutu kuat tekan yang dihasilkan. Dari hasil pengujian waktu ikat dan kuat tekan pasta semen geopolimer tersebut, V2 dipilih sebagai variabel terbaik, dan digunakan untuk tahap penelitian beton semen geopolimer.

### 4.3 Performa Beton Semen Geopolimer

#### 4.3.1 Kuat Tekan Beton

Berikut merupakan hasil pengujian kuat tekan beton semen geopolimer seluruh variabel pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari:

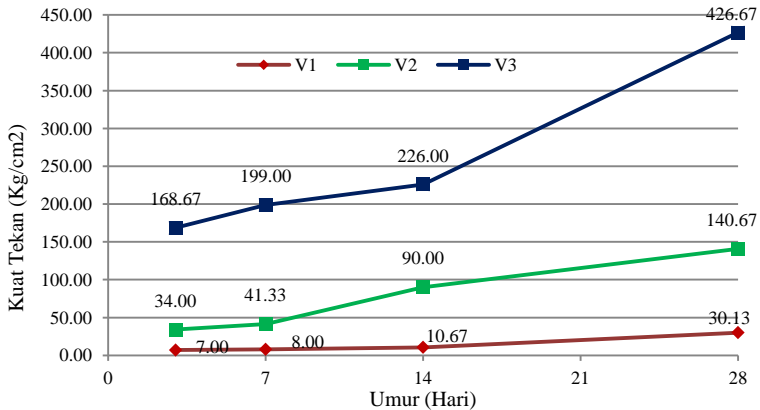
**Tabel 4. 12** Desain Campuran Awal (Dasar) Beton Semen Geopolimer Per m<sup>3</sup>

Variabel	Semen (Kg)	Agregat Kasar (Kg)	Agregat Halus (Kg)	Air (Kg)	w/c*
V1	360	1224	816	57,24	0,159
V2	480	1152	768	76,32	0,159
V3	720	1008	672	114,48	0,159

\* Rasio w/c menggunakan rasio w/c pasta semen geopolimer V2 sebagai perencanaan awal

**Tabel 4. 13** Desain Campuran Awal (Dasar) Terkoreksi (Kadar Air dan Penyerapan Air Oleh Agregat) Beton Semen Geopolimer Per m<sup>3</sup>

Variabel	Semen (Kg)	Agregat Kasar (Kg)	Agregat Halus (Kg)	Air (Kg)	w/c*
V1	360	1224	816	71,9	0,20
V2	480	1152	768	90,1	0,19
V3	720	1008	672	126,5	0,19



**Gambar 4. 9** Grafik Nilai Kuat Tekan Seluruh Variabel Semen Geopolimer

**Tabel 4. 14** Nilai Kuat Tekan Beton Semen Geopolimer

No.	Kode Variabel	Kuat Tekan Rata-Rata (Kg/cm <sup>2</sup> )*			
		3 Hari	7 Hari	14 Hari	28 Hari
1.	V1	3,00	8,00	10,67	30,13
2.	V2	34,00	41,33	90,00	140,67
3.	V3	168,67	199,0	226,0	426,67

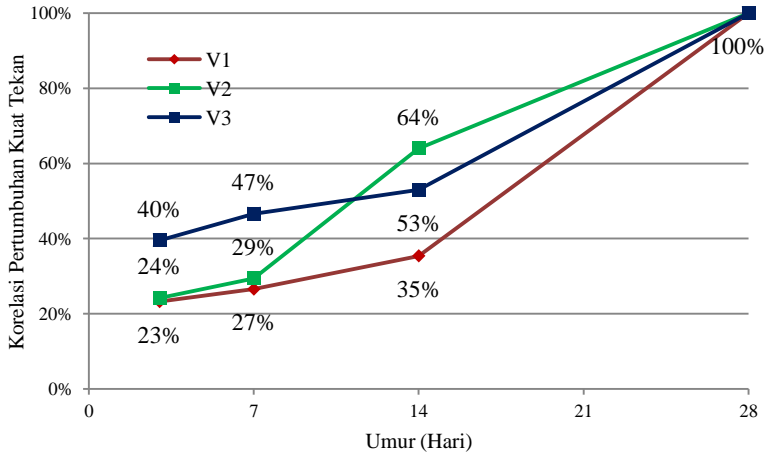
\* Kuat Tekan Rata-Rata dari 3 (dua) Benda Uji Per Umur Pengujian

Dari hasil pengujian kuat tekan diatas, variabel dengan nilai kuat tekan tertinggi ialah V3. Hal ini menyimpulkan bahwa, semakin tinggi konten semen geopolimer, maka nilai kuat tekan juga semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan. Kemudian jika di klasifikasikan berdasarkan mutu beton, maka hasilnya sebagai berikut:

**Tabel 4. 15** Hasil Klasifikasi Mutu beton Semen Geopolimer

No.	Kode Variabel	Kuat Tekan Rata-Rata (Kg/cm <sup>2</sup> )	Klasifikasi
1.	V1	30,13	Non-Struktur
2.	V2	140,67	Non-Struktur
3.	V3	426,67	Struktural Sedang

Berikut merupakan grafik korelasi umur pengujian terhadap pertumbuhan nilai kuat tekan (%):



**Gambar 4. 10** Grafik Korelasi Umur Pengujian Terhadap Pertumbuhan Nilai Kuat Tekan Beton Semen Geopolimer

**Tabel 4. 16** Korelasi Umur Pengujian Terhadap Pertumbuhan Nilai Kuat Tekan Beton Semen Geopolimer

No.	Kode Variabel	Korelasi (%)			
		3 Hari	7 Hari	14 Hari	28 Hari
1.	V1	23	27	35	100
2.	V2	24	29	64	100
3.	V3	40	47	53	100

Dari hasil korelasi diatas, nilai pertumbuhan kuat tekan yang paling cepat ialah V3, disusul V2 dan V1. Hal tersebut menyimpulkan, bahwa semakin tinggi konten semen dan mutu beton, maka semakin cepat pertumbuhan kuat tekanya.

### 4.3.2 UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*)

Pengujian UPV yang dilakukan terhadap variabel beton terbaik yaitu V3 pada umur 28 hari. Berikut hasilnya:

**Tabel 4. 17** Hasil Pengujian UPV Pada Beton Semen Geopolimer Variabel Terbaik (V3)

Benda Uji No.	Jarak, L (m)	Waktu, T ( $\mu$ s)	Kecepatan, V (Km/s)
1	0,05	16,6	3,012
2	0,05	15,2	3,289
3	0,05	15,7	3,185
Rata-Rata			3,162
Kategori Berdasarkan Standar IS 13311-1-1992			Sedang (3,0 – 3,5)

Dari hasil pengujian UPV tersebut, disimpulkan bahwa beton semen geopolimer V3 memiliki kualitas sedang menurut standar IS 1311-1-1992. Hal tersebut didapatkan dari nilai kecepatan (v) UPV rata-rata yang menunjukkan nilai 3,162 Km/s berada dalam kisaran 3,0 – 3,5 Km/s.

### 4.3.3 Estimasi Nilai Kuat Tarik Belah Beton dan Modulus Elastisitas

Telah dijelaskan dalam tinjauan pustaka (Gambar 2.24), dari hasil pengujian kuat tekan, maka kita dapat memprediksi nilai kuat tarik belah beton dengan (Persamaan 4.1) berikut:

$$\text{Kuat Tarik Belah} = 0,3387 \times \text{Kuat Tekan}^{0,6805} \quad (4.1)$$

No.	Kode Variabel	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)*	Estimasi Kuat Tarik Belah (MPa)
1.	V1	2,5	0,632
2.	V2	11,7	1,803
3.	V3	35,4	3,837

\* Satuan Kg/cm (K) ke MPa (fc) di konversi dengan mengalikan 0,83

Selain mengestimasi nilai kuat tarik belah beton, berikut merupakan hasil estimasi nilai modulus elastisitas (E, MPa) berdasarkan hasil pengujian UPV (lihat Persamaan 2.17) pada tinjauan pustaka TAT ini. Dan berikut hasilnya:

**Tabel 4. 18** Densitas Rata-Rata Beton Semen Geopolimer

No.	Kode Variabel	Densitas Beton Rata-Rata (Kg/m <sup>3</sup> )
1.	V1	2604,000
2.	V2	2620,613
3.	V3	2568,000

$$E = \frac{3,162^2 \times 2568 \times (1 + 0,1375)(1 - 2 \times 0,1375)}{1 - 0,1375} = 24549,86 \text{ MPa}$$

Dari hasil perhitungan sesuai persamaan 2.17, didapatkan estimasi nilai modulus elastisitas beton semen geopolimer V3 sebesar 24.549,86 MPa.

#### 4.4 Analisa Harga Bahan Produksi Beton Semen Geopolimer

Berikut merupakan analisa harga bahan produksi dari beton semen geopolimer dan dibandingkan dengan harga beton semen portland dengan kadar yang sama:

##### 4.4.1 Tinjauan dengan Harga Aktivator Skala Retail

**Tabel 4. 19** Analisa Harga Bahan Produksi Semen Geopolimer Variabel Terbaik (V3) dengan Harga Aktivator Skala Retail

Material	Harga Satuan/Kg	%	Harga/Kg
Fly Ash	Rp. 116,50	82,5	Rp. 96,11
Sodium Hidroksida	Rp. 10.000,00	5,075	Rp. 507, 50
Sodium Silikat Pentahidrat	Rp. 17.500,00	12,425	Rp. 2.174,38
<b>Total Harga Semen Geopolimer/Kg</b>			<b>Rp. 2.777,99</b>

**Tabel 4. 20** Analisa Harga Bahan Produksi Beton Semen Geopolimer (GC) dan Perbandinganya dengan Beton Semen Portland (PC) dengan Harga Aktivator Skala Retail

Material	Harga Satuan/Kg	Kadar (Kg/m <sup>3</sup> )	
		GC	PC
Semen Geopolimer	Rp. 2.777,99	720	
Semen Portland	Rp. 1.625,00		720
Pasir Lumajang	Rp. 148,00	1008	1008
Batu Pecah Pasuruan	Rp. 197,00	672	672

Material	Jumlah Harga	
	GC	PC
Semen Geopolimer	RP. 2.000.152,8	-
Semen Portland	-	RP. 1.170.000,0
Pasir Lumajang	Rp. 149.184	Rp. 149.184
Batu Pecah Pasuruan	Rp. 132.384	Rp. 132.384
<b>Total Harga Beton/m<sup>3</sup></b>	Rp. 2.000.434,37	Rp. 1.451.568,00

Dari hasil analisa harga tersebut, dapat disimpulkan bahwa harga semen geopolimer 1,68 kali lebih tinggi dari semen portland, dan harga beton semen geopolimer 1,71 kali lebih tinggi dari beton semen portland.

#### 4.4.2 Tjnjauan dengan Harga Aktivator Skala Komersial (Supplier)

Jika nantinya diproduksi skala retail, maka harga aktivator diestimasi dapat turun mulai dari 10% hingga 50% seperti pada 2 (dua) contoh produk berikut:

**Tabel 4. 21** Perbandingan Harga Skala Retail dan Skala Komersial (langsung supplier) pada Produk Semen Portland

Harga Semen Portland Eceran (Retail) per Kg	Harga Semen Portland Skala Jumbo (Langsung dari Supplier) per Kg	Harga Supplier/Harga Retail (%)
Rp. 1.625,00	Rp. 800,00	49,23

**Tabel 4. 22** Perbandingan Harga Skala Retail dan Skala Komersial (langsung supplier) pada Produk Tambang Batu Kethak

Harga Batu Kethak (Retail) per m <sup>3</sup>	Harga Batu Kethak (Langsung dari Supplier) per Kg	Harga Supplier/Harga Retail (%)
Rp. 133.000	Rp. 14.000	10,53

Sehingga, jika diaplikasikan terhadap harga aktivator pada semen geopolimer, menghasilkan harga skala komersial per Kg sebagai berikut:

**Tabel 4. 23** Analisa Harga Bahan Produksi Semen Geopolimer Variabel Terbaik (V3) dengan Harga Aktivator Skala Komersial

Material	Harga Satuan/Kg	%	Harga/Kg
Fly Ash	Rp. 116,50	82,5	Rp. 96,11
Sodium Hidroksida	Rp. 4.923,10	5,075	Rp. 249,85
Sodium Silikat Pentahidrat	Rp. 8.615,25	12,425	Rp. 1.014,53
<b>Total Harga Semen Geopolimer/Kg</b>			<b>Rp. 1.360,49</b>
<b>Harga Semen Portland/Kg</b>			<b>Rp. 1.625,00</b>

**Tabel 4. 24** Analisa Harga Bahan Produksi Beton Semen Geopolimer (GC) dan Perbandingannya dengan Beton Semen Portland (PC) dengan Harga Aktivator Skala Komersial

Material	Harga Satuan/Kg	Kadar (Kg/m <sup>3</sup> )	
		GC	PC
Semen Geopolimer	Rp. 1.360,49	720	
Semen Portland	Rp. 1.625,00		720
Pasir Lumajang	Rp. 148,00	1008	1008
Batu Pecah Pasuruan	Rp. 197,00	672	672
Material	Jumlah Harga		
		GC	PC
Semen Geopolimer	RP. 979.552,80		-
Semen Portland	-		RP. 1.170.000,0
Pasir Lumajang	Rp. 149.184		Rp. 149.184
Batu Pecah Pasuruan	Rp. 132.384		Rp. 132.384
<b>Total Harga Beton/m<sup>3</sup></b>	Rp. 1.261.120,80		Rp. 1.451.568,00



Dari hasil analisa harga tersebut, dengan menggunakan estimasi harga aktivator skala retail, dapat disimpulkan bahwa harga semen geopolimer 16,27% lebih rendah dari semen portland, dan harga beton semen geopolimer 13,12% lebih rendah dari beton semen portland. Dengan demikian harga semen geopolimer masih dapat bersaing dengan semen portland.

#### 4.5 Potensi Keunggulan

Bahan pengikat semen geopolimer memiliki sifat yang saling menutupi kelemahan antara bahan geopolimer berbasis basah dan bahan pengikat semen portland, sehingga memiliki potensi sebagai teknologi semen yang ramah lingkungan, aplikatif, dan memiliki performa yang tinggi. Selengkapnya lihat (Tabel 4.21) berikut:

**Tabel 4. 25** Potensi Keunggulan Beton Semen Geopolimer

No.	Geopolimer Metode Basah	Semen Portland	Geopolimer Metode Kering (Semen Geopolimer)
1.	Pemakaiannya harus menyiapkan dan menghitung berdasarkan perbandingan kimia larutan NaOH, Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , dan bahan pozzolan (Abdullah et al, 2013).	Pemakaiannya hanya menambahkan air saja pada semen portland, sesuai rasio air terhadap semen yang diinginkan (Subakti et al, 2012).	Pemakaiannya seperti semen portland.
2.	Waktu ikat awal cenderung lebih cepat, yaitu 5 - 58 menit (Sahana R, 2013)	Waktu ikat awal ideal, yaitu 153 Menit.	Waktu ikat awal ideal, yaitu 150 menit (hampiri mirip dengan semen portland)
3.	Lebih ramah lingkungan, karena bahan utamanya (bahan pozzolan) mayoritas bersumber dari alam maupun limbah sisa industry yang memiliki kandungan Si & Al tinggi (Abdullah et al, 2013)	Kurang ramah lingkungan, karena melepas CO <sub>2</sub> yang tinggi (penyumbang 4 - 5% dari total CO <sub>2</sub> di dunia) dalam proses produksi klinker yang membutuhkan temperature ± 1450° C (Subakti et al, 2012).	Lebih ramah lingkungan, seperti halnya binder geopolimer berbasis basah.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berasarkan hasil penelitian yang telah diterangkan diatas, berikut merupakan kesimpulan yang dapat disampaikan:

1. Dari hasil pengujian karakteristik material didapatkan kesimpulan bahwa: Fly Ash yang digunakan ialah Tipe C (*High Calcium*) dan memiliki diameter rata-rata partikel 18,072  $\mu\text{m}$ . Untuk material pengisi didapatkan kadar air agregat kasar dan agregat halus, masing-masing 1,155 dan 0,88%; serta penyerapan air agregat sebesar 0,44% dan 0,14%; kemudian, zona gradasi masing-masing yaitu zona maks 10mm dan zona 2.
2. Desain komposisi semen geopolimer dan pasta semen geopolimer memvariabelkan konten aktivator mulai dari: 15%, 17,5%, dan 20%; dengan rasio NaOH :  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  sebesar 1 : 2,5; serta rasio w/c mulai dari 0,165; 0,159; dan 0,154. Dari hasil pengujian PSD semen geopolimer memiliki diameter rata-rata partikel 56 - 60 $\mu\text{m}$ . Kemudian, pengujian waktu ikat semen geopolimer yang paling ideal ialah V2 dengan waktu 150 menit (hampir mirip semen portland). Serta, nilai kuat tekan pada umur 14 hari paling tinggi ialah V2 dengan nilai 422,00  $\text{Kg/cm}^2$ . V2 menjadi desain campuran semen geopolimer terbaik dan dipakai untuk penelitian tahap selanjutnya yaitu beton semen geopolimer.
3. Desain komposisi beton semen geopolimer memvariabelkan konten semen (dari variabel terbaik atau V2) mulai dari: 360  $\text{Kg/m}^3$  (Sedang); 480  $\text{Kg/m}^3$  (Tinggi); dan 720  $\text{Kg/m}^3$  (Sangat Tinggi); densitas beton 2400  $\text{Kg/m}^3$ ; rasio agregat kasar : agregat halus sebesar 60% : 40%; dan rasio w/c 0,159. Dari hasil pengujian kuat tekan beton, mutu beton tertinggi diraih

oleh V3 dengan nilai  $426,67 \text{ Kg/cm}^2$  pada umur 28 hari. Jika diklasifikasikan, maka beton tersebut termasuk dalam mutu struktural tingkat sedang. Pengujian UPV juga dilakukan dengan hasil kualitas “baik” (nilai  $v = 3,162 \text{ Km/s}$ ). Estimasi nilai kuat tarik belah beton ialah  $3,837 \text{ MPa}$  dan estimasi nilai modulus elastisitas nya bernilai  $24.549,86 \text{ MPa}$ .

4. Harga semen geopolimer (dengan harga aktivator skala retail) ialah Rp. 2.777,99/Kg; namun, jika ditinjau dari skala komersial, harga semen geopolimer masih dapat bersaing dengan semen portland, masing-masing yaitu: Rp. 1.360,49/Kg dan Rp. 1.625,00/Kg. Sedangkan untuk beton semen geopolimer (dengan harga aktivator skala retail) ialah Rp. 2.000.434/m<sup>3</sup>; namun, jika ditinjau dari skala komersial, harga beton semen geopolimer masih dapat bersaing dengan beton semen portland, masing-masing yaitu: Rp. 1.261.120,80 dan Rp. 1.451.568/m<sup>3</sup>.
5. Keunggulan dari bahan pengikat geopolimer berbasis fly ash dengan metode pencampuran kering ini adalah memiliki sifat yang dapat menutupi kelemahan antara bahan pengikat geopolimer metode pencampuran basah dan bahan pengikat semen portland, dari segi: Pemakaian (sama seperti semen portland tidak se rumit menyiapkan geopolimer berbasis basah), Workabilitas (memiliki nilai waktu ikat awal yang hampir mirip semen portland yaitu 150 menit dan tidak terlalu cepat seperti geopolimer berbasis basah), dan Ramah lingkungan (tidak memerlukan proses klinkerisasi  $1450^\circ\text{C}$  dan melepas  $\text{CO}_2$  ke atmosfer karena material penyusun bahan pengikat dapat diperoleh dari sisa pembakaran batu bara [Fly Ash] industri PLTU dan industri terkait).

## 5.2 Saran

Adapun saran dari apa yang telah didapatkan dari penelitian ini untuk diperbaiki dalam penelitian terkait untuk selanjutnya, yaitu:

1. Perlu adanya :
  - a. Proses kalsinasi atau pembakaran pada semen geopolimer setelah digiling dengan temperature 200°C minimal hingga 800°C maksimal, setelah semen geopolimer digiling, atau
  - b. Pada proses penggilingan alat giling dilengkapi juga dengan pemanas dengan temperature seperti (saran 1.a).

untuk meningkatkan keaktifan semen geopolimer agar kuat tekan pada umur awal (3 hari) dapat lebih meningkat dari apa yang telah dicapai pada penelitian ini, dan grafik sebaran partikel semen geopolimer dalam pengujian PSD dapat menjadi 1 (satu) peak.

2. Harga semen geopolimer 1.68 lebih tinggi dari beton semen portland yang menyebabkan harga beton semen geopolimer juga 1,71 kali lebih tinggi. Faktor utamanya ialah harga aktivator (skala retail) yang mahal ( $\text{NaOH} = \text{Rp. } 10.000$  dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \text{Rp. } 17.500$ ), hal tersebut dapat ditanggulangi dengan nantinya produksi komersial, sehingga harga aktivator dapat berlaku juga skala komersial yang mana harganya dapat mencapai 10,53% - 49,23% lebih rendah daripada harga retail.
3. Perlu juga dilakukan standarisasi produk semen geopolimer seperti layaknya semen portland dengan pengujian-pengujian lebih lanjut, seperti: blaine, waktu ikat akhir, pemuaihan dan penyusutan, kuat tekan mortar 3, 7, dan 28 hari, panas hidrasi, dan lain-lain.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## DAFTAR PUSTAKA

Permanent Committee on Technology and Safety Japan Soda Industry Association. (2006). *Safe Handling of Caustic Soda (Sodium Hidroksida)* (2nd ed.). Tokyo: Japan Soda Industry Association.

Abdullah, M. M., Razak, R. A., Yahya, Z., Hussin, K., Ming, L. Y., Yong, H. C., et al. (2013). *Asas Geopolimer (Teori & Amali)* (1st ed.). Perlis: Unit Penerbitan Universiti Malaysia Perlis.

American Standards of Testing Materials (ASTM). (2016). *Concrete and Aggregates Volume 04 02*. ASTM.

Anuradha, R., V., S., R., V., & B.V., R. (2011). *Modified Guidelines for Geopolymer Concrete Mix Design Using Indian Standard*. Coimbatore; Perth.

Bijoy Krishna Halder, V. T. (2013). *Influence of Coal Fly Ash on Mechanical Properties of Mortar Consisting of Total Dissolved Solids*.

Hardjito, D. (2005). *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Perth: Curtin's Institutional Research Repository.

Indian Standards. (1992). *Non-Destructive Testing of Concrete- Methods of Test, Part 1: Ultrasonic Pulse Velocity*. New Delhi: Indian Standards.

J K Tishmack, J. O. (1999). *Characterization of High-Calcium Fly Ashes and Their Potential Influence on Ettringite Formation in Cementitious Systems*. *CCAGDP*, (pp. 82-92).

Jeffrey C. Petermann, A. S. (2010). *Alkali-Activated Geopolymers: A Literature Review*. Panama: Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate.

John L. Provis, J. S. (2009). *Geopolymers : Structure, Processing, Properties and Industrial Applications* (1st ed.). Cambridge: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC.

Konig, S. (2010). *Global Mining Investment Conference 2010 : Strategic Metals and The Clean-Tech Revolution*. London.

Liew Yun-Ming, H. C.-Y. (2016, Agustus 20). Structure and Properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress In Materials Science* , pp. 596-610.

McKinsey Global Institute Analysis. (2013). *Bridging Global Infrastructure gaps*. Retrieved November 25, 2016, from <http://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/bridging-global-infrastructure-gaps>

Mina Mohebbi, F. R. (2015). Reliability of Loss on Ignition (LOI) Test for Determining the Unburned Carbon Content in Fly Ash. *World of Coal Ash (WOCA) Conference* . Nashville: World of Coal Ash.

Portland Cement Association. (1994). Concrete Technology Today : High-Strength Concrete. *High Strength Concrete* , 15 (1), 1-8.

PT. Semen Gresik. *Brochure of Standart Spesification of Cement Products*. Gresik: PT. Semen Gresik.

R, S. (2013). Setting time, compressive strength and microstructure of geopolymer paste. *IJIRSET* , 2 (1), 311-316.

R, S. (2013). Setting Time, Compressive Strength and Microstructure Of Geopolymer Paste. *IJIRSET* , 311-316.

Subakti, A., Picesa, B., & Irawan, M. (2012). *Teknologi Beton dalam Praktik*. Surabaya: ITS Press.



Sullivan, E. (2015). *Cement Outlook*. Illinois.

Susanto, T. E. (2016, 12). Semen Geopolimer [ PT. Semen Indonesia (persero), Tbk].

World Economic Forum. (2016). *The Global Competitiveness Report 2016-2017*. Geneva: World Economic Forum.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## BIODATA PENULIS



### **Abdul Karim Yasin,**

Penulis lahir pada tanggal 23 Maret 1995 dan merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, Penulis bernama lengkap Abdul Karim Yasin, merupakan lulusan dari MINU Trate Putra Gresik, SMP Negeri 3 Gresik, SMA Negeeri 1 Manyar Gresik, dan D-III Teknik Sipil (Bangunan Gedung) ITS. Penulis merupakan mahasiswa lanjut jenjang pada Program Studi D-IV Teknik Sipil (Bangunan Gedung) Departemen Teknik Infrastruktur Sipil Fakultas Vokasi ITS 2016. Total 8 (delapan) semester dengan 144 sks telah dijalani penulis hingga lulus dari program studi D-IV Teknik Sipil (Bangunan gedung) ini. Selama 8 (delapan) semester, penulis juga aktif dalam organisasi, seperti: Himpunan Mahasiswa Diploma Sipil (HMDS) Departemen Riset dan Teknologi tahun 2014/2015 (sebagai sekretaris) dan tahun 2015/2016 (sebagai staff ahli/ketua divisi kompetisi teknik sipil). Selain itu, penulis juga menorehkan beberapa prestasi baik akademik maupun non-akademik, skala nasional maupun internasional, seperti: Parade Senja Istana Negara 2011, Juara 2 umum divisi utama GPMB 2012, Juara 1 Thailand International Marching Band Festival 2014 (bersama MB. Semen Indonesia), Juara 1 lomba beton nasional dua kali (Jakarta-dan Malang) 2015, Delegasi PIMNAS 28 (Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional) 2015, Partisipan International Highest Early Strength Self-Compacting Concrete Competition (Lomba Beton Berkekuatan Awal Tinggi) ACI-KL Malaysia 2016, Juara umum International UTM Bridge Model Competition (Lomba Desain Jembatan Internasional) Johor Bahru, Malaysia 2017, Dan dianugerahi penghargaan Juara 2 Mahasiswa Berprestasi Program Diploma Tingkat ITS 2016. Untuk menghubungi penulis dapat via email: [ryma.karim4@gmail.com](mailto:ryma.karim4@gmail.com).

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

## LAMPIRAN

### A. Dokumentasi Pameran Teknologi HARDIKNAS, 2 Mei 2017.



### B. Dokumentasi Pameran Green Cement Industry, 25 Mei 2017.



### C. Ditampilkan pada Media Cetak Jawa Pos, 28 Mei 2017.

**Pendidikan**  
**Dry Geopolymer Pengganti Semen**  
 MINGGU, 28 MEI 2017 22:59 | EDITOR : SURYO EKO PRASETYO



**ATAR RELAKANG**  
 Proses pembuatan dry geopolymer menggunakan bahan-bahan yang sama dengan semen. Hanya saja, dry geopolymer menggunakan bahan-bahan yang berbeda, yaitu abu terbang, silika, dan silika aktif. Selain itu, dry geopolymer juga menggunakan bahan-bahan yang berbeda, yaitu abu terbang, silika, dan silika aktif. Selain itu, dry geopolymer juga menggunakan bahan-bahan yang berbeda, yaitu abu terbang, silika, dan silika aktif.

**RAMAH LINGKUNGAN:** Karim menunjukkan dry geopolymer. (Foto: Jawa Pos.com/Praseptyo)

**Berita Terkait**  
 Aktis Ang dan Pabli, Sanik, Wangi, dan Dasa Seng Uda Teror

JawaPos.com - Isu perusakan lingkungan dan pencemaran udara telah lama mengiringi proses pembuatan semen. Karena itu, dibutuhkan terobosan untuk mengganti proses tersebut dengan bahan-bahan yang lebih ramah lingkungan. Salah satunya, dry geopolymer cement karya mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Penelitian tersebut dilakukan Abdul Karim Yasin sejak November 2016. Mahasiswa semester VIII D-4 Teknik Infrastruktur Sipil ITS itu dibimbing dua dosen. Yakin, Ridho Hayuaji dan Tri Eddy Susanto.

Karim menjelaskan, dry geopolymer buasannya berasal dari tiga bahan. Yakin, abu terbang sebagai bahan utama. Abu terbang berasal dari hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap. Dalam hal ini, Karim mendapatkan bahan tersebut dari pembangkit listrik di Paton.

### D. Publikasi Ilmiah Literatur Review pada Konferensi Internasional GCEE di UM Malang, untuk dipresentasikan pada Agustus 2017.

#### **A Review in Geopolymer Binder with Dry Mixing Method (Geopolymer cement)**

Abdul Karim Yasin<sup>1, a)</sup>, Ridho Bayuaji<sup>1, b)</sup>, and Tri Eddy Susanto<sup>2, c)</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Infrastructure Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, JL. Menur 127, Surabaya, Indonesia

<sup>2</sup>Departement of Research and Product Application, PT. Semen Indonesia (persero) Tbk, JL. Veteran, Gresik, Indonesia

<sup>a)</sup>abdul.karim13@mhs.ce.its.ac.id

<sup>b)</sup>a3ridho@gmail.com

<sup>c)</sup>tri.susanto@semenindonesia.com

**Abstract.** This paper reviews and explains the potential of more applicable geopolymer binder for use. This method is called: "Dry Mixing Method of Geopolymer Binder-Cement Geopolymer". The mean is that the geopolymer binder is presented in a dry form (like cement powder), which is contains some solid alkali activator and pozzolan materials. How to use it exactly the same as mixing portland cement in general. Through this dry mixing method, it is expected to create a new industry that produces geopolymer cement. With the presence of geopolymer cement, people no longer need to calculate the composition of molarity ratio of the chemicals in the form of the activator alkali solution and pozzolan materials commonly used (wet method of geopolymer binder). In this paper the author will briefly explain the concept in calculating the composition of dry mixing method of geopolymer binder.