



TUGAS AKHIR –TL184834

**STUDI PENGARUH RASIO FLY ASH (FA)/SLAG ALUMINIUM
TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK GEOPOLIMER
BERBASIS FA**

**MUHAMMAD MAULANA
NRP. 0251154000016**

**Dosen Pembimbing
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**



TUGAS AKHIR–TL 184834

**STUDI PENGARUH RASIO FLY ASH (FA)/SLAG
ALUMINIUM TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK
GEOPOLIMER BERBASIS FA**

MUHAMMAD MAULANA
NRP. 0251154000016

Dosen Pembimbing
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT–TL 184834

**STUDY OF THE EFFECT FLY ASH (FA)/ALUMINUM
SLAG RATIO TO PHYSICAL AND MECHANICAL
CHARACTERISTIC OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER**

MUHAMMAD MAULANA
NRP. 0251154000016

Supervisors
Sigit Tri Wicaksono, S.Si, M.Si., Ph.D.
Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

MATERIAL AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**STUDI PENGARUH RASIO FLY ASH (FA)/SLAG
ALUMINIUM TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK
GEOPOLIMER BERBASIS FA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MUHAMMAD MAULANA
NRP 0251154000016

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. (Pembimbing I)
2. Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc. (Pembimbing II)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDI PENGARUH RASIO FLY ASH (FA)/SLAG ALUMINIUM TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK GEOPOLIMER BERBASIS FA

Nama : Muhammad Maulana
NRP : 02511540000016
Departemen : Teknik Material
Pembimbing I : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph. D.
Pembimbing II : Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

Abstrak

Penggunaan batu bara yang tiap tahun terus meningkat menyebabkan limbah hasil dari pembakaran batu bara berupa abu layang (fly ash) semakin menumpuk. Limbah fly ash ini tergolong berbahaya, akan tetapi kaya akan silika dan alumina yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan dasar geopolimer. Sifat mekanik geopolimer yang cenderung sama dengan semen, bahkan seringkali lebih baik menjadikan geopolimer sebagai material alternatif yang dapat menggantikan semen dalam bahan konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh rasio Fly Ash (FA) dan slag terhadap sifat fisik dan mekanik geopolimer berbasis FA. Geopolimer disintesis dengan mencampurkan larutan aktivator NaOH dan Na_2SiO_3 pada fly ash dan slag. Rasio fly ash/slag yang digunakan 70:30, 75:25, dan 80:20 %wt dengan temperatur curing 55 °C dan 30 °C. Berdasarkan hasil pengujian XRD pada geopolimer terdapat dua fasa utama yang muncul yaitu fasa quartz dan mullite. Fly ash dan slag dengan rasio 70:30 %wt, dengan temperatur curing 55 °C menunjukkan nilai densitas dan kuat tekan tertinggi dengan nilai masing-masing sebesar 1784,71 kg/m³ dan 3,865 Mpa. Selain itu, geopolimer dengan rasio 70:30 dan temperatur curing 30 °C menghasilkan nilai penyerapan air yang terendah sebesar 15,12%.

Kata Kunci : *Geopolimer, Fly ash, Slag, Rasio, Temperatur curing*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STUDY OF THE EFFECT FLY ASH (FA)/ALUMINUM SLAG RATIO TO PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTIC OF FLY ASH BASED GEOPOLYMER

Student Name : Muhammad Maulana
NRP : 0251154000016
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph. D.
Co-Supervisor : Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.

Abstract

The utilization of coal is exponentially increase every year and result in fly ash waste product which categorize as hazardous material. However this fly ash contain rich silica and alumina which can be used for geopolymers synthesize. The characteristic of geopolymer are similarity correspond to cement, often even better make this geopolymer as an alternative materials for construction application. The goal of this research is to studying the effect fly ash (FA) and aluminium slag ratio to the physical and mechanical properties FA-based geopolymer. Geopolymer is synthesized by mixing NaOH and Na₂SiO₃ alkaline activator into fly ash and slag. The ratio of fly ash/slag is 70:30, 75:25, and 80:20 %wt with curing temperature of 55 °C and 30 °C. XRD results present two main phases, quartz and mullite phase. Fly ash / slag ratio at 70:30 with 55 °C of curing temperature shows the highest density and compressive strength with values of 1784,71 kg/m³ and 3,865 MPa respectively. Furthermore, geopolymer at 70:30 ratio with 30 °C of curing temperature showed the lowest water absorption with 15,12%.

Keywords : *Geopolymer, Fly ash, Slag, Ratio, Curing temperature*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW. Syukur penulis ucapkan atas selesainya mata kuliah Tugas Akhir sebagai kewajiban mahasiswa Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS, Surabaya

Selama melaksanakan dan menyelesaikan Tugas Akhir ini, penulis banyak menerima bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaika terima kasih kepada:

1. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas bimbingannya selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.
2. Ibu Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas bimbingannya selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.
3. Bapak Ir. Wahjudi Heru P. selaku pembina Tugas Akhir atas saran dan masukannya selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu, saran dan kritik yang konstruktif sangat diharapkan.

Demikian penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya khususnya bagi sesama mahasiswa yang bergerak di bidang material inovatif.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, 27 Januari 2020
Penulis

Muhammad Maulana

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Geopolimer	5
2.1.1 Reaksi Geopolimerisasi.....	7
2.2 Abu Layang (<i>Fly Ash</i>).....	8
2.3 <i>Slag</i> Aluminium.....	10
2.4 Basa Aktivator	13
2.5 Semen	14
2.6 Penelitian Sebelumnya.....	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Penelitian	19
3.2 Bahan dan Alat Penelitian.....	21
3.2.1 Bahan Penelitian.....	21
3.2.2 Alat Penelitian	21
3.3 Prosedur Penelitian	23
3.3.1 Pembuatan Basa Aktivator	23
3.3.2 Sintesis Geopolimer	23
3.4 Pengujian	24
3.4.1 Pengujian Tekan.....	24
3.4.2 Pengujian <i>Digital USB Microscope</i>	24

3.4.3	Pengujian XRD.....	24
3.4.4	Pengujian Penyerapan Air	25
3.4.5	Pengujian XRF	25
3.4.6	Pengujian Densitas	25
3.5	Rancangan Penelitian.....	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Karakterisasi Awal.....	29
4.1.1	Komposisi Kimia <i>Fly Ash</i>	29
4.1.2	Komposisi Kimia <i>Slag</i>	31
4.2	Hasil Karakterisasi <i>X-ray Diffraction (XRD)</i>	32
4.3	Analisa Morfologi <i>Microscope Digital</i>	34
4.4	Pengujian Penyerapan Air (<i>Water Absorption</i>)	36
4.5	Pengujian Densitas.....	38
4.6	Pengujian Kuat Tekan (<i>Compressive Strength</i>)	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	45
5.2	Saran	45
DAFTAR PUSTAKA		47
LAMPIRAN		53
UCAPAN TERIMA KASIH		67
BIODATA PENULIS		69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema diagram pembentukan geopolimer	5
Gambar 2.2	Struktur tiga unit monomer pembentuk geopolimer.....	6
Gambar 2.3	Reaksi geopolimerisasi pada geopolimer	8
Gambar 2.4	Pengaruh variasi <i>Fly Ash</i> dan <i>Slag</i> pada kuat tekan geopolimer.....	18
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	20
Gambar 4.1	Hasil XRD sampel geopolimer	33
Gambar 4.2	Hasil pengamatan mikroskop morfologi geopolimer rasio A) 70:30. B) 75:25 dan C) 80:20 dengan perbesaran 370X	35
Gambar 4.3	Grafik penyerapan air pada geopolimer dengan rasio sampel 70:30, 75:25, dan 80:20	37
Gambar 4.4	Nilai densitas geopolimer berbasis FA rasio 70:30, 75:25 dan 80:20	39
Gambar 4.5	Grafik kuat tekan geopolimer berbasis FA dengan rasio 70:30, 75:25 dan 80:20.....	41

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi dan klasifikasi abu layang.....	9
Tabel 2.2	Pengelompokan kelas abu layang berdasarkan ASTM C 618.....	10
Tabel 2.3	Jenis-jenis semen portland.....	15
Tabel 2.4	Komposisi semen portland.....	16
Tabel 2.5	Komposisi kimia dari <i>Fly Ash</i> (F/A) dan <i>Blast Furnace Slag</i> (B/S).....	17
Tabel 2.6	Variasi F/A dan B/S.....	17
Tabel 3.1	Rincian komposisi spesimen tiap variabel.....	26
Tabel 3.2	Rancangan penelitian.....	27
Tabel 4.1	Komposisi kimia abu layang.....	29
Tabel 4.2	Komposisi kimia <i>slag</i>	31

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini sudah banyak penelitian terkait geopolimer yang dilakukan karena kemampuan sifat mekanik dari geopolimer. Geopolimer sendiri merupakan polimer anorganik yang terbentuk dari aluminosilikat yang teraktivasi oleh alkali aktivator seperti NaOH dan KOH yang bertindak sebagai prekursor pada geopolimer (Komnitsas, 2011). Kemampuan dari sifat mekanik pada geopolimer yang baik menjadikan geopolimer mampu menggantikan penggunaan semen Portland. Dalam hal sifat mekanik serta kinerja, geopolimer memiliki sifat yang setara dengan semen Portland, bahkan seringkali memiliki sifat yang lebih baik dibandingkan dengan semen Portland (Duxson, *et al.*, 2007). Peran geopolimer yang dapat menggantikan penggunaan semen berdampak baik pada lingkungan karena dapat mengurangi emisi CO₂ yang dihasilkan pada produksi semen. Bahan dasar material pembuatan geopolimer berupa material yang mengandung banyak silika dan alumina.

Material yang mengandung silika dan alumina serta bisa digunakan sebagai bahan dasar geopolimer, di antaranya adalah abu layang (*fly ash*) dan *slag*. Abu layang adalah limbah padat yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara seperti pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), pabrik semen dan pabrik kertas yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakunya dalam jumlah besar dan terus meningkat tiap tahun (Harijono, 2006). Nugraha, 2017 menyebutkan penggunaan batu bara terus meningkat sehingga pada tahun 2015 mencapai total 96 juta ton konsumsi batu bara yang menyebabkan limbah abu layang terus menumpuk. Penumpukan limbah ini dapat berakibat fatal pada lingkungan sehingga abu layang harus dimanfaatkan. Selain itu bahan lain yang dapat dijadikan bahan dasar atau tambahan dalam pembuatan geopolimer adalah *slag*.

Slag merupakan limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun) yang dalam istilah luasnya mencakup produk non logam yang dihasilkan dari pemisahan logam dari bijihnya, sifat kimia dan morfologinya bergantung pada logam yang diproduksi dan proses yang digunakan (nationalslag.org, 2013). *Slag* yang digunakan merupakan *slag* aluminium hasil peleburan aluminium, umumnya peleburan aluminium menghasilkan limbah abu yang masih mengandung residu aluminium sebesar 20-45 % (Rini, 2019). Beberapa penelitian menyebutkan bahwa *slag* bisa dijadikan sebagai bahan agregat pembangunan jalan, bahan lapis pondasi, dan juga digunakan sebagai bahan tambahan pada pembuatan semen Portland sebesar 5%.

Peran serta kemampuan geopolimer yang bisa menggantikan semen, sering kali dikaitkan dengan penggunaan geopolimer dalam pembuatan beton atau bahan konstruksi lainnya, beton yang dicampurkan dengan geopolimer sering disebut beton geopolimer yang rata-rata juga memiliki kuat tekan yang tinggi sehingga bisa digunakan untuk aplikasi-aplikasi beton seperti pada umumnya. Penggunaan bahan konstruksi yang beragam kondisi lingkungannya mengharuskan bahan tersebut mampu digunakan pada berbagai lingkungan seperti lingkungan basah layaknya laut dan danau. Selain sifat mekanik, kemampuan sifat fisik dari geopolimer seperti penyerapan air juga perlu diketahui untuk memastikan geopolimer dapat digunakan pada kondisi tersebut. Namun, kendala pada *fly ash* yang mempunyai sifat berbeda-beda tergantung metode pembakaran dan jenis batu bara yang digunakan. Akibatnya, abu layang yang dihasilkan memiliki komposisi kimia seperti rasio Si/Al, ukuran partikel, serta sifat fisika-kimianya tidak akan sama meskipun dihasilkan dari tempat yang sama. Sifat-sifat tersebut akan mempengaruhi geopolimerisasi dari abu layang ketika geopolimer disintesis (Fansuri, *et al.*, 2008).

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis komposisi rasio yang bisa menghasilkan sifat fisik dan mekanik yang paling baik.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh rasio %wt *fly ash* dan *slag* terhadap sifat fisik dan mekanik geopolimer berbasis FA?

1.3 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil akhir yang baik dan sesuai dengan yang diinginkan, serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh pengotor pada *fly ash*, dan *slag* diabaikan
2. Pencampuran komponen ketika proses pembuatan geopolimer dianggap homogen
3. Pengaruh kelembapan terhadap spesimen saat pengujian mekanik maupun karakterisasi diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah menganalisis pengaruh rasio %wt antara *fly ash* dan *slag* terhadap sifat fisik dan mekanik geopolimer berbasis FA.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang formulasi geopolimer berbasis abu layang yang dihasilkan serta diharapkan geopolimer bisa menggantikan semen Portland dalam aplikasi seperti pada pondasi bangunan, bahan bangunan dan lain lain.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

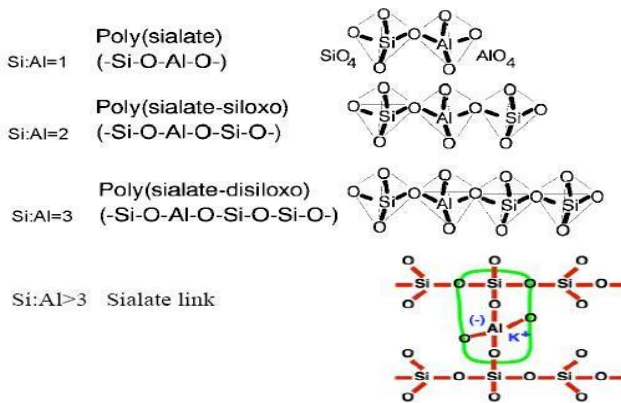
2.1 Geopolimer

Istilah geopolimer pertama kali digunakan oleh seorang profesor berkebangsaan Prancis bernama Davidovits pada tahun 1978 untuk menjelaskan tentang mineral polimer yang dihasilkan melalui *geochemistry*. Geopolimer didefinisikan sebagai perekat tanpa semen yang sangat mirip seperti zeolite dan disintesis sebagai hasil dari beberapa reaksi yang berbeda antara larutan basa dan bahan baku aluminosilikat (Davidovits, 1994). Polimer aluminosilikat sering disintesis melalui bahan-bahan limbah industri berbentuk padat yang banyak mengandung alumina (Al) dan silika (Si) (Manuahe, *et al.*, 2014). Selama proses sintesis, ion silikat dan alumuninat menyatu dan membentuk blok yang secara kimia memiliki struktur yang mirip dengan batuan alam. Pada saat komponen solid dan komponen aktivator dicampur terjadi proses pengerasan yang disebabkan oleh terbentuknya *aluminosilicate network* (jaringan aluminosilikat) yang bervariasi antara amorf dan kristalin (Putra, *et al.*, 2014). Secara umum reaksi pembentukan geopolimer dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema diagram pembentukan geopolimer
(Yun-Ming, *et al.*, 2016)

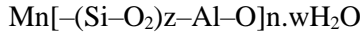
Geosintesis atau geopolimerisasi pada umumnya dapat ditunjukkan dengan reaksi dari campuran padatan aluminosilikat dengan larutan alkalin pada kondisi basa yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al-O. Ikatan polimer dibentuk oleh unit-unit monomer yang bergantung pada rasio silika/alumina. Ikatan polimer yang paling baik jika rasio Si:Al adalah lebih dari 3 sehingga menghasilkan ikatan yang mempunyai *cross link*. Struktur dari unit-unit monomer geopolimer telah digambarkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Struktur tiga unit monomer pembentuk geopolimer (Llyod & Rangan , 2010)

Jaringan geopolimer tersusun oleh jaringan tiga dimensi SiO₄ dan AlO₄ yang berbentuk tetrahedral yang dihubungkan oleh oksigen dari kedua senyawa (Davidovits, 1991). Penggunaan oksigen sebagai penghubung akan membuat muatan Al memiliki bilangan koordinasi empat [Al(OH)₄⁻] sehingga akan bermuatan negatif. Muatan negatif ini diseimbangkan oleh kation seperti Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca⁺, Ba⁺, NH₄⁺, dan H₃O⁺. Peran kation sangat penting untuk menjaga netralitas struktur dari geopolimer (Khale & Chaudhary, 2007).

Geopolimer secara umum memiliki rumus empiris untuk menjelaskan struktur tiga dimensi aluminosilikat sebagai berikut:

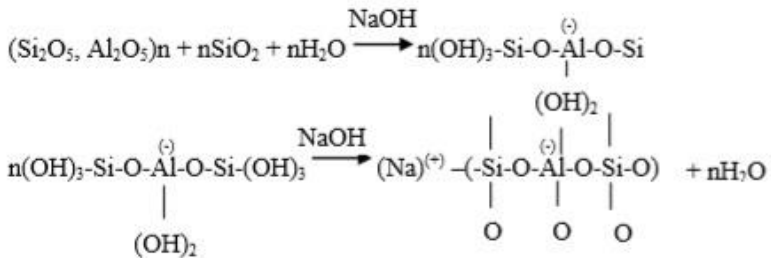


Dimana “M” adalah unsur alkali, simbol “-“ menunjukkan adanya ikatan, “z” berupa 1, 2, 3 dan “n” adalah derajat polimerisasi, serta “w” adalah banyaknya air (H₂O) yang diikat (Olawale, 2013). Di antara bahan-bahan yang sering digunakan untuk pembuatan polimer ada *fly ash* yang banyak mengandung Al dan Si.

2.1.1 Reaksi Geopolimerisasi

(Buchwald, *et al.*, 2011) mengelompokkan reaksi geopolimerisasi ke dalam dua tahap. Reaksi pertama adalah proses pelarutan silikat dan aluminat yang diperoleh dari sumber aluminosilikat seperti *slag*, abu layang dan *clay* serta reaksi kedua adalah kondensasi aluminosilikat. Reaksi geopolimerisasi sendiri termasuk reaksi polimerisasi anorganik mirip seperti pada zeolite dan yang membedakan hanya terdapat fase amorf.

Reaksi geopolimerisasi dimulai ketika komponen-komponen silika dan alumina di permukaan partikel abu layang dilarutkan ke dalam larutan basa aktivator yang digunakan dan diubah menjadi ion-ion silikat dan aluminat. Selanjutnya ion-ion silikat dan aluminat yang terlarut bereaksi membentuk rantai polimer. Larutan basa yang digunakan adalah sangat pekat, demikian pula larutan ion-ion silikat dan aluminat yang terbentuk. Oleh karena itu ion-ion tersebut tidak dapat bermigrasi dalam jarak yang jauh dari tempat asalnya sehingga reaksi polimerisasi terjadi di permukaan partikel abu layang induknya. Proses pelarutan ion-ion silikat dari abu layang terus terjadi selama masih ada larutan basa kuat, demikian pula dengan proses polimerisasinya. Pemakaian larutan basa pengaktif dengan pH yang tinggi bertujuan untuk mengubah struktur aluminat dari struktur oktahedral menjadi tetrahedral. Aluminat pada pH rendah memiliki struktur oktahedral, sedangkan reaksi geopolimerisasi hanya dapat berlangsung ketika ion aluminat dan ion silikat memiliki struktur tetrahedral.



Gambar 2.3 Reaksi geopolimerisasi pada geopolimer
(Davidovits, 1994)

Reaksi geopolimerisasi dapat dilihat pada Gambar 2.3, ion hidroksil dari larutan basa aktivator akan memutus ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al, membentuk kompleks intermediet Si(OH)₄ dan Al(OH)₄⁻. Muatan negatif dari proses ini kemudian di stabilkan oleh logam Na⁺ atau K⁺ dari basa aktivator menjadi Si-O-Na⁺ dan Al-O-Na⁺ untuk mencegah reaksi balik menjadi Si-O-Si dan Si-O-Al awal (Provis & van Deventer, 2009). Si(OH)₄ dan Al(OH)₄⁻ kemudian mengalami polikondensasi membentuk jaringan 3D. reaksi polikondensasi ini mengarahkan pada presipitasi fasa solid dan kristalisasi dari jaringan tiga dimensi. Air yang digunakan sebagian terlepas melalui proses kondensasi dan sebagian lainnya terperangkap dalam jaringan tiga dimensi gel aluminosilikat. Jaringan tiga dimensi tersebut secara kontinyu akan terus terpolimerisasi dan semakin lama akan menghasilkan jaringan tiga dimensi yang terhubung kuat (Bakharev, 2005). Reaksi geopolimerisasi tentu saja terjadi pada bahan yang mempunyai aluminosilikat seperti abu layang (*fly ash*) sebagai sumber pembentukan geopolimer.

2.2 Abu Layang (*Fly Ash*)

Abu layang atau *fly ash* merupakan hasil sampingan dari proses pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berbentuk butiran halus (Manuahe, *et al.*, 2014).

Meskipun abu layang termasuk dalam salah satu limbah B3 (Bahan Beracun dan Berbahaya), abu layang saat ini banyak digunakan untuk pengembangan penelitian sebagai bahan baku pembuatan geopolimer. Abu layang berpotensi menjadi material geopolimer karena banyak mengandung senyawa aluminosilika (Xu & van Deventer, 2000). Karakteristik kimia dan fisika dari abu layang ini sangat dipengaruhi dari metode pembakaran, sumber batubara, suhu pembakaran dan bentuk partikel. Hal itu menyebabkan belum adanya *mix design* yang pasti pada pembuatan geopolimer (Fansuri, *et al.*, 2008).

Secara umum komponen abu layang terdiri dari SiO_2 , Al_2O_3 , CaO dan Fe_2O_3 yang berada dalam bentuk amorf dan Kristal oksida serta berbagai mineral lainnya seperti MgO , TiO_2 , SO_3 , P_2O_5 , dan karbon (Xiao, *et al.*, 2016). Adapun komposisi kimia dan klasifikasinya seperti dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi dan klasifikasi abu layang (Wardani, 2008)

Komponen	Bituminus	Subbituminus	Lignit
SiO_2	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	5-35	20-30	20-25
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO_3	0-4	0-2	0-10
Na_2O	0-4	0-2	0-6
K_2O	0-3	0-4	0-4

Berdasarkan komposisi kimianya, ASTM C 618 mengelompokkan abu layang ke dalam tiga kelas yaitu kelas N, F, dan C. Abu layang kelas N merupakan material pozzolan alami yang terkalsinasi. Abu layang kelas F diproduksi dari pembakaran

batu bara antrasit atau bituminus yang bersifat pozzolan sedangkan kelas C berasal dari pembakaran batubara jenis lignite atau *sub-bituminus* yang bersifat pozzolan dan *cementitious*. Seperti dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Pengelompokan kelas abu layang berdasarkan ASTM C 618 (Wardani, 2008)

Persyaratan	Komposisi (%)		
	Kelas C	Kelas F	Kelas N
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	50	70	70
Belerang trioksida (SO_3)	5	5	4
Kelembaban	3	3	3
Susut bakar	6	6	10

Selain abu layang, di antara sumber bahan pembuatan geopolimer yang juga banyak mengandung alumina (Al) dan silika (Si) adalah *slag*.

2.3 *Slag* Aluminium

Slag adalah produk samping dari pemurnian logam. Biasanya *slag* seperti *glass* adalah bahan yang tersisa dari hasil ekstrak bijih mentahnya suatu logam. *Slag* biasanya merupakan campuran logam oksida dan silikon dioksida. Namun, *slag* dapat mengandung logam sulfida dan logam unsur. Umumnya *slag* digunakan untuk menghilangkan limbah dalam peleburan logam, *Slag* juga dapat dimanfaatkan untuk tujuan lain, seperti membantu dalam kontrol temperatur peleburan, dan meminimalkan re-oksidasi dari produk logam cair akhir sebelum logam cair dikeluarkan dari tungku dan digunakan untuk membuat logam padat. Dalam beberapa proses peleburan, seperti peleburan ilmenit untuk menghasilkan titanium dioksida, *Slag* adalah produk berharga dan bukan logam (Zhang, 2019).

Sifat kimia dan fisik (termasuk keaktifan) *slag* bergantung pada jenis bahan baku yang digunakan (bijih, fluks, bahan bakar) dalam *furnace*. Kondisi pendinginan lelehan *slag* memainkan peran penting dalam membentuk properti *slag*. Jika pendinginan dilakukan cukup cepat, biasanya pada granulasi dengan aliran air atau kering, proses kristalisasi *glass* mungkin tidak terjadi dan kemudian, *slag* menjadi cairan yang terlalu dingin. Sifat metastasis *glass* adalah sumber energi yang signifikan dalam proses hidrasi *slag*, dalam praktiknya, ini bertujuan untuk membuat karakteristik fase *glass* untuk lebih dari 90% massa *slag*. *slag* biasanya mengandung 30-50% CaO, 28-40% SiO₂, 6-24% Al₂O₃ dan 1-18% dari MgO (Mezhov, 2019).

Dalam konteks peleburan aluminium, *slag* akan mengandung residu aluminium sebesar 20-45%. *Slag* merupakan bongkahan atau serpihan partikel berwarna abu-abu, mengandung bahan kimia beracun yang dapat mencemari lingkungan, sehingga perlu menerapkan prinsip kehati-hatian dalam pemanfaatan *slag*. Limbah *slag* akan menghasilkan gas beracun seperti gas amonia, gas metan, dan gas hidrogen sulfida saat terendam air. Proses peleburan dross aluminium menggunakan bahan tambahan garam KCl dan NaCl sebanyak 8% dari komposisi total, yang dilanjutkan dengan pencucian asam sulfat dan diikuti dengan asam amonia. Setelah aluminium dipisahkan dan diambil, sisa dross yang bercampur dengan flux dan larutan asam menjadi limbah *slag* yang berpotensi mencemari tanah, air tanah dan air permukaan yang biasanya dibuang ke tempat pembuangan akhir dengan sistem landfill. Di Amerika Serikat, aluminium oksida dalam dross dimanfaatkan dalam produksi semen portland sebagai campuran sebanyak 5% dari komposisi semen.

Slag aluminium terdiri dari fraksi kasar yang mengandung kadar logam yang tinggi dan fraksi debu halus yang mengandung oksida dan garam. Umumnya limbah *slag* aluminium masih mengandung logam aluminium (10-20%), campuran garam flux (40-55%), dan aluminium oksida (20-50%). Campuran garam flux disebut salt cake mengandung 5-7% residu aluminium, 15-30%

aluminium oksida, 30–55% NaCl, dan 15–30% KCl serta serpihan yang mengandung karbida, nitrida dan fosfida, serta polychlorinated dibenzop-dioxins and dibenzofurans (PCDD and PCDF).

Slag juga dikategorikan sebagai limbah B3 (Bahan Beracun dan Berbahaya) yang mengakibatkan *slag* tidak dapat dibuang begitu saja ke lingkungan dan dapat menyebabkan pencemaran, sehingga penanganannya juga butuh proses yang terstruktur (Uyun, 2018). Pembuangan limbah *slag* aluminium secara sembarangan dapat menghasilkan lindi logam berat beracun ke dalam air tanah dan menimbulkan gangguan kesehatan. Bahan kimia dalam *slag* sangat reaktif dengan air dan udara lembab, menghasilkan gas beracun, berbahaya, mudah meledak, beracun dan berbau tidak sedap, antara lain gas NH_3 , CH_4 , PH_3 , H_2 , dan H_2S_2 (Environmental Agency Protection, 2002). Oleh karena penumpukan limbah yang terus menerus bertambah ini maka *slag* mulai dimanfaatkan untuk berbagai kegunaan baik dalam bentuk agregat apapun.

Slag dapat diproses menjadi agregat halus maupun kasar tergantung pemanfaatan yang akan digunakan nantinya. Pengolahan yang tepat dan pengontrolan mutu yang khusus sangat diperlukan dalam pengolahan *slag* menjadi agregat. *Slag* yang halus bentuknya seperti pasir banyak digunakan sebagai bahan pengganti pasir biasa di dalam beton (Haikal, *et al.*, 2014). Pemanfaatan *slag* untuk aplikasi industri maupun konvensional sangat beragam, di antaranya: sebagai pengganti sebagian isi semen pada beton, produksi *glass*, bahan sand blasting, produksi ubin, produksi serbuk keramik, rel, pemberat jalan, konstruksi jalan, dan lain lainnya yang sudah banyak diteliti oleh para ahli (Joulazadeh & Joulazadeh, 2010). Namun penggunaan *slag* paling sering adalah sebagai bahan dasar pembuatan pasta geopolimer yang kemudian dijadikan bahan agregat untuk pembuatan beton atau yang biasa kita kenal sebagai beton geopolimer. Untuk mereaksikan *slag* dan *fly ash* agar menjadi geopolimer melalui reaksi geopolimerisasi dibutuhkan aktivator sebagai sumbernya.

Aktivator yang sering digunakan berupa alkalin seperti NaOH atau KOH dan *water glass* (Na_2SiO_3).

2.4 Basa Aktivator

Basa aktivator atau basa pengaktif dibutuhkan dalam reaksi polimerisasi untuk mengaktifkan prekursor (sumber alumina silikat) sehingga membebaskan aluminat (AlO_4^-) dan silikat (SiO_4) yang memiliki struktur tetrahedral sehingga mengalami proses polikondensasi dan mengalami geopolimerisasi. Umumnya, larutan basa aktivator yang digunakan dalam sintesis geopolimer adalah alkali silikat (Na_2SiO_3 atau K_2SiO_3) atau alkali hidroksida (NaOH atau KOH) (Yun-Ming, *et al.*, 2016). Ion alkali dalam proses *curing* SiO_4 dan AlO_4 membentuk jaringan polimer tiga dimensi dengan membentuk ikat silang. Ion alkali bertindak sebagai penetral muatan (*charge balancer*) untuk tiap molekul tetrahedron [AlO_4].

Konsentrasi alkali aktivator yang digunakan sangat berpengaruh pada kekuatan mekanik geopolimer. Hal itu disebabkan karena, sifat dan konsentrasi dari alkali aktivator berpengaruh pada struktur geopolimer (Komljenovic, 2015). Semakin besar konsentrasi alkali aktivator maka semakin besar sumber aluminosilikat yang dapat larut. Pelarutan sumber aluminosilikat yang semakin banyak berhubungan dengan kuat tekan geopolimer yang semakin besar (Xu & van Deventer, 2000). Ukuran ion Na^+ dan ion K^+ yang biasanya digunakan berpengaruh pada proses pelarutan sumber aluminosilikat. Aluminosilikat lebih mampu larut secara sempurna dalam ion Na^+ , karena memiliki ukuran yang lebih kecil dibandingkan ion K^+ sehingga mampu berikatan dengan ion silikat dan ion aluminat dan membentuk monomer dan dimer yang stabil dalam larutan geopolimer (Rahier, 2007). Alasan lainnya penggunaan NaOH sebagai alkali aktivator adalah karena lebih ekonomis dibandingkan dengan KOH (Yun-Ming, *et al.*, 2016).

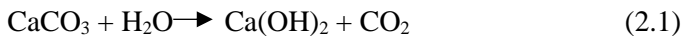
Selain NaOH, penambahan *water glass* atau Na_2SiO_3 pada pembuatan geopolimer dapat meningkatkan kuat tekan. (Palomo,

et al., 1999) melaporkan pembuatan geopolimer dengan penambahan *water glass* dapat menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan hingga 90 Mpa. Kombinasi penggunaan NaOH dan Na₂SiO₃ lebih sering digunakan untuk tujuan efektivitas biaya dan kuat tekan geopolimer yang dihasilkan lebih baik dari pada menggunakan Na₂SiO₃ atau NaOH saja (Leong, *et al.*, 2016). Namun, kemampuan kerja dan kuat tekan dapat mengalami penurunan oleh peningkatan lebih lanjut dari rasio basa pengaktif/abu dan Na₂SiO₃ dan NaOH.

2.5 Semen

Semen adalah suatu jenis bahan adesif dan kohesif yang memungkinkan melekatnya fragmen-fragmen mineral menjadi suatu massa yang padat jika dicampur dengan air, sehingga terbentuk pasta semen. Semen merupakan suatu hasil industri yang dapat menjadi sangat kompleks dengan campuran serta susunan yang berbeda-beda, digunakan sebagai bahan pengikat (*bonding material*) (Tjokrodimuljo, 1998). Semen dapat dibagi menjadi dua kelas, yaitu:

1. Semen non hidrolis adalah semen yang tidak dapat mengeras dalam air atau tidak stabil dalam air. Contoh semen non hidrolis adalah *lime* dimana *lime* ini merupakan perekat klasik dalam bangunan yang dibuat dengan memanaskan limestone pada temperatur 850 °C. CaCO₃ dari *limestone* akan melepaskan CO₂ dan menghasilkan *burn lime* atau *quick lime* (CaO).



Reaksi 2.1 menunjukkan reaksi cepat dengan air menghasilkan Ca(OH)₂ dalam butiran yang halus dan Ca(OH)₂ ini tidak dapat mengeras dalam air tetapi dapat mengeras bila bereaksi dengan CO₂ dari udara membentuk CaCO₃ kembali.

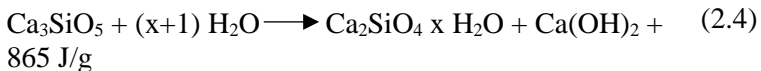
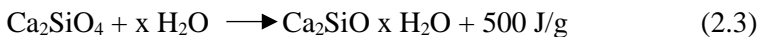
2. Semen hidrolik adalah semen yang dapat mengeras dalam air menghasilkan padatan yang stabil dalam air. Contoh semen hidrolik adalah semen Portland, semen campur, semen khusus dan lain-lainnya.

Berdasarkan ASTM C150-02a semen Portland biasa diidentifikasi sebagai tipe I. Tipe lain dari semen Portland dan penggunaannya dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Jenis-jenis semen portland (ASTM C150-02a, 2002)

Jenis	Penggunaan
I	Konstruksi biasa, sifat khusus tidak diperlukan
II	Konstruksi biasa, resistensi terhadap sulfur atau panas dari hirasi
III	Jika diinginkan kekuatan permukaan yang tinggi
IV	Jika diinginkan panas yang rendah dari hidrasi
V	Jika diinginkan daya tahan yang tinggi terhadap sulfat

Keberadaan senyawa-senyawa silikat dan aluminat dalam semen menyebabkan terjadinya reaksi dengan air jika semen dicampur dengan air. Akibatnya terbentuk suatu senyawa hidrat sebagai produk dari proses hidrasi yang selanjutnya akan terjadi pengerasan massa. Reaksinya kompleks, tetapi secara umum dapat dituliskan pada Reaksi 2.2, 2.3 dan 2.4 (van Vlack, 1985):



Reaksi di atas hanya berlaku untuk semen Portland yang banyak digunakan oleh masyarakat. Reaksi kimia antara semen Portland dengan air menghasilkan senyawa yang disertai dengan pelepasan panas. Kondisi ini mengandung resiko besar terhadap

penyusutan beton yang berakibat pada keretakan beton. Reaksi semen dengan air dibedakan menjadi dua, yaitu periode pengikatan dan periode pengerasan. Pengikatan merupakan peralihan dari keadaan plastis menuju keadaan keras. Sedangkan pengerasan adalah penambahan kekuatan setelah pengikatan selesai (Tjokrodimuljo, 1995).

Komposisi untuk semen Portland berdasarkan SNI 15-2049-2015, ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Komposisi semen portland (SNI 15-2049-2015, 2015)

Oksida	Komposisi (%)
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0,5-0,6
MgI ₂	0,1-6
K ₂ O	0,5-1,3

2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh (Kim & Kim, 2012), dengan memvariasikan komposisi antara *slag* dan *fly ash* serta aktivatornya untuk diamati karakteristiknya yang tertuju pada kuat tekan yang dihasilkan. *Fly ash* yang digunakan berasal dari pembangkit listrik tenaga uap batu bara, sedangkan *slag* yang digunakan berasal dari *blast furnace*. Pada *fly ash* yang digunakan fasa yang dimiliki hampir seluruhnya kristalin dan fasa pada *slag*nya hampir seluruhnya amorfus setelah dianalisis menggunakan XRD. Komposisi dari *slag* dan *fly ash* ditunjukkan pada Tabel 2.5.

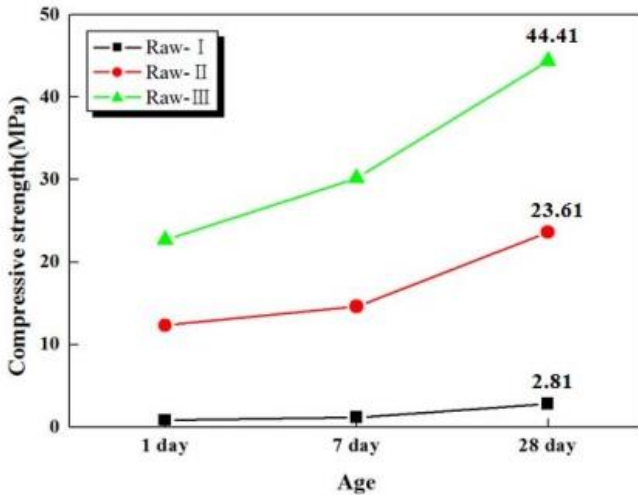
Tabel 2.5 Komposisi kimia dari *Fly Ash* (F/A) dan *Blast Furnace Slag* (B/S) (Kim & Kim, 2012).

Chemical Compositions (wt%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. Loss
F/A	21,9	8,46	6,05	45,4	6,06	0	6,65
B/S	37,3	12,49	0,26	43,4	5,31	0	0

Basa pengaktif yang digunakan berupa NaOH dan Na₂SiO₃ (*water glass*), spesimen geopolimer dicetak pada cetakan berukuran 50 x 50 x 50mm³ untuk mengukur kekuatan tekan dari geopolimer tersebut. Uji tekan dilakukan pada hari 1,7, dan 28 setelah *curing* selama 24 jam di luar cetakan. Tabel 2.6 menunjukkan rasio pencampuran dari geopolimer. Secara umum, semakin lama waktu spesimen sebelum diuji tekan maka semakin kuat pula kekuatan tekan geopolimer yang dihasilkan. Pada uji tekan spesimen 1 (FA:BS=100:0), didapatkan nilai kuat tekan terendah adalah sebesar 0,79 Mpa setelah 1 hari dan paling tinggi setelah 28 hari adalah sebesar 2,81 Mpa dan ini menunjukkan bahwa tidak terjadi reaksi polimerisasi karena komposisi Al₂O₃ dan SiO₂ tidak mencapai 30wt%. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4 bahwa kuat tekan geopolimer yang terbuat dari FA dan *slag* lebih kuat dibandingkan geopolimer yang hanya terbuat dari FA saja. Dapat disimpulkan bahwa geopolimer yang hanya terbuat dari FA tidak dapat digunakan karena kuat tekannya tidak memenuhi persyaratan untuk aplikasi pada bidang konstruksi.

Tabel 2.6 Variasi F/A dan B/S (Kim & Kim, 2012).

Sampel	F/A, B/S : NaOH, Water	F/A : B/S	NaOH (M)
Raw- I		100 : 0	
Raw- II	100 : 40	50 : 50	2.78
Raw- III		0 : 100	



Gambar 2.4 Pengaruh variasi *Fly Ash* dan *Slag* pada kuat tekan geopolimer (Kim & Kim, 2012)

Penelitian ini menyimpulkan bahwa pencampuran FA dan *slag* untuk pembuatan geopolimer menghasilkan kuat tekan yang meningkat seiring dengan meningkatnya rasio B/S dan waktu *curing*. Kekuatan tekan yang dihasilkan paling baik berdasarkan konsentrasi molaritas NaOH adalah setelah hari ke-28 dengan komposisi FA dan *slag* berbanding 50:50 dengan nilai kuat tekan 14,46 Mpa.

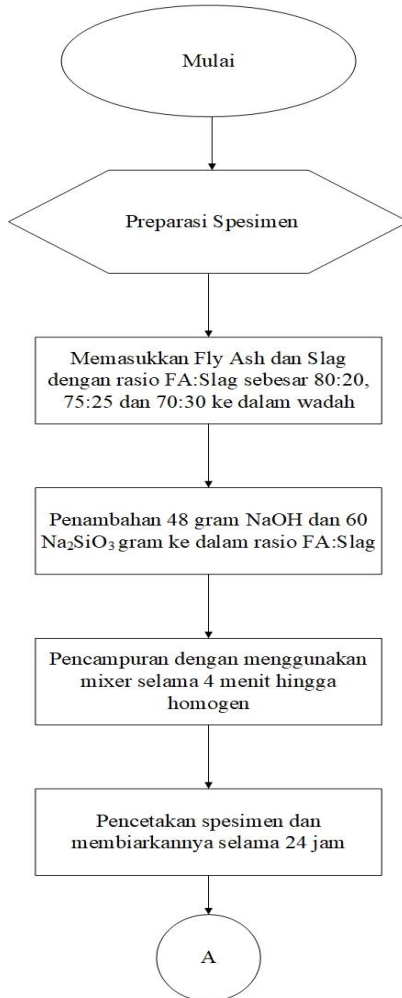
Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat tekan lebih baik yang dihasilkan geopolimer dengan bahan baku FA dan *slag* serta menganalisis sifat fisik dari geopolimer karena FA yang digunakan tiap penelitian selalu berbeda dan butuh studi lebih lanjut agar dapat dimanfaatkan pada aplikasi bidang konstruksi maupun bidang lainnya.

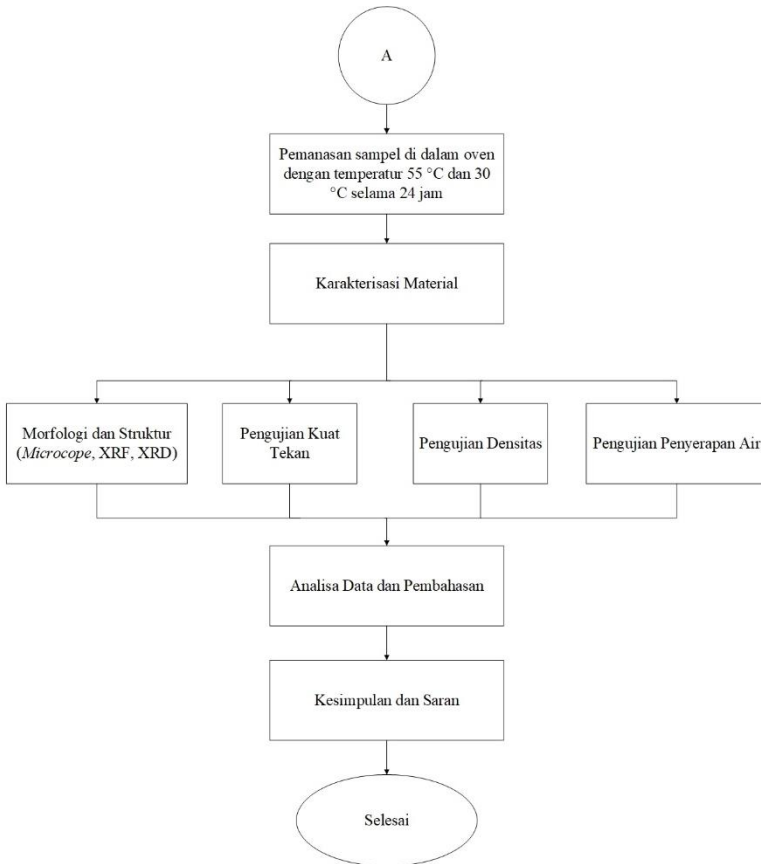
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Penelitian

Tahapan penelitian secara umum ditunjukkan pada Gambar

3.1.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

3.2 Bahan dan Alat Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa bahan dan alat penelitian sebagai berikut:

3.2.1 Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa bahan yang digunakan, yaitu:

1. *Fly Ash*

Fly ash atau abu layang pada penelitian ini digunakan sebagai bahan dasar dari pembuatan geopolimer karena banyak mengandung alumina (Al) dan silika (Si) yang menjadi rantai dasar geopolimerisasi. *Fly Ash* yang digunakan berasal dari PT. X dengan spesifikasi SiO_2 43%, Al_2O_3 16.7%, Fe_2O_3 28%, CaO 3%.

2. *Slag Aluminium*

Slag hasil peleburan aluminium juga merupakan bahan yang mengandung aluminosilikat sehingga bisa digunakan untuk pembuatan geopolimer dan diharapkan mampu memberikan tambahan sifat yang baik pada geopolimer. *Slag* yang digunakan berasal dari PT. X dengan spesifikasi sebagai berikut: Al_2O_3 : 85.5%, CaO : 4.67%, Fe_2O_3 : 4.7%.

3. NaOH

NaOH atau natrium hidroksida pada penelitian ini digunakan sebagai bahan aktivator dalam proses aktivasi geopolimer, penambahan NaOH dalam kadar tertentu juga mampu memberikan sifat mekanik yang baik.

4. Na_2SiO_3

Na_2SiO_3 atau natrium silikat berfungsi dalam aktivasi polimer dan juga mempercepat reaksi geopolimerisasi.

5. Aquades

Aquades digunakan untuk melarutkan bahan-bahan lain agar diperoleh konsentrasi larutan yang diinginkan dan mempermudah pencampuran.

3.2.2 Alat Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa alat yang digunakan, yaitu:

1. Timbangan Digital
Timbangan digital digunakan untuk menentukan berat bahan-bahan penelitian agar sesuai dengan komposisi.
2. Ayakan 100 Mesh
Ayakan digunakan untuk mengayak *fly ash* agar didapatkan butiran yang lebih halus dikarenakan butiran yang halus mempengaruhi kekuatan pada geopolimer yang dihasilkan.
3. Mixer
Mixer digunakan untuk mencampurkan bahan-bahan seperti *fly ash*, *slag* dan aktivator agar menjadi pasta geopolimer.
4. Oven
Oven digunakan untuk mempercepat laju polimerisasi pada geopolimer dengan cara dipanaskan.
5. Mesin Uji Tekan
Mesin uji tekan digunakan untuk menguji kekuatan tekan dari geopolimer, standar yang digunakan dalam pengujian ini adalah ASTM C39-86.
6. Alat-Alat Karakterisasi
Alat karakterisasi spesimen yang digunakan ada beberapa alat, yaitu:
 - a. *X-Ray Diffraction (XRD)* adalah pengujian yang digunakan untuk mengetahui unsur dan senyawa yang terbentuk. Data hasil XRD berupa grafik dengan puncak intensitas terhadap 2θ . Prinsip dasar XRD adalah mendisfraksi cahaya melalui celah kristal. Radiasi yang digunakan berupa sinar-X, electron dan neutron.
 - b. *Digital USB Microscope*, alat ini digunakan untuk melakukan pengamatan pada permukaan geopolimer yang telah disintesis untuk selanjutnya dianalisis.
 - c. *X-Ray Fluorescence*, alat ini digunakan untuk mengetahui komposisi dari *fly ash* dan *slag* yang digunakan. Sehingga dapat dilakukan pengelompokan berdasarkan kandungan Silika, Alumina, dan kalsiumnya. Pada akhirnya pengelompokan ini dapat membantu dalam proses identifikasi sifat fisik dan mekanik.

3.3 Prosedur Penelitian

Beriku ini merupakan prosedur yang dilakukan pada penelitian ini:

3.3.1 Pembuatan Basa Aktivator

Prosedur pertama adalah pembuatan basa aktivator dengan langkah sebagai berikut:

1. Menimbang 48 gram NaOH
2. Menambahkan 100 ml air, sehingga didapatkan NaOH 12M
3. Menambahkan 60 gram Na_2SiO_3 ke dalam larutan
4. Mengaduk larutan hingga terlarut sempurna
5. Mendinginkan larutan selama 24 jam hingga kembali ke temperatur ruangan

3.3.2 Sintesis Geopolimer

Langkah selanjutnya adalah sintesis geopolimer dengan tata cara sebagai berikut:

1. Mengayak *fly ash* dan *slag* dengan ayakan 100 mesh agar mendapatkan material yang lebih halus
2. Menimbang *fly ash* dan *slag* sesuai dengan rasio yang digunakan (80:20, 75:25 dan 70:30)
3. Menambahkan 48 gram NaOH dan 60 gram Na_2SiO_3
4. Mixing menggunakan mixer selama empat menit hingga homogen
5. Mencetak menggunakan pipa paralon sesuai dengan ketentuan ASTM C39-86
6. Setelah satu hari, memasukkan geopolimer yang sudah kering ke dalam oven dengan 55 °C selama 24 jam pada beberapa variasi
7. Membiarkan geopolimer selama 28 hari untuk proses *curing*.

3.4 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan data yang sesuai dengan tujuan penelitian, pengujian akan dilakukan pada sampel berumur 28 hari. Pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.4.1 Pengujian Tekan

Pengujian tekan dilakukan kepada spesimen sesuai dengan ASTM C39-86 dengan menggunakan perbandingan antara diameter dan tinggi tabung sebesar 1:2. Diameter tabung yang digunakan adalah 1 inci dan tingginya adalah 2 inci (ASTM International, 2007). Pengujian tekan akan menghasilkan data tegangan yang dihasilkan oleh mesin uji tekan yang selanjutnya dikonversi menjadi kuat tekan setelah membaginya dengan luas penampang dari spesimen uji.

3.4.2 Pengujian *Digital USB Microscope*

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *Digital USB Microscope* 1000X untuk mengamati struktur permukaan dari sampel. Geopolimer yang telah selesai disintesis nantinya akan diamati permukaannya untuk melihat morfologi strukturnya dalam perbesaran tertentu.

3.4.3 Pengujian XRD

X-Ray Diffraction adalah pengujian yang digunakan untuk mengetahui unsur dan senyawa yang terbentuk. Data hasil XRD berupa grafik dengan puncak intensitas terhadap 2θ . Prinsip dasar XRD adalah mendifraksi cahaya melalui celah kristal. Radiasi yang digunakan berupa sinar-X, electron dan neutron. Ketika berkas sinar-X berinteraksi dengan suatu material, maka sebagian berkas akan diabsorpsi, ditransmisikan, dan sebagian lagi dihamburkan terdifraksi. Hamburan terdifraksi inilah yang dideteksi oleh XRD. Berkas sinar X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-X

yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi. Ukuran kristal ditentukan berdasarkan pelebaran puncak difraksi sinar X yang muncul. Kristal yang berukuran besar dengan satu orientasi menghasilkan puncak difraksi yang mendekati sebuah garis vertikal. Kristal yang sangat kecil menghasilkan puncak difraksi yang sangat lebar. Lebar puncak difraksi tersebut yang memberikan informasi tentang ukuran kristal.

3.4.4 Pengujian Penyerapan Air

Uji penyerapan air dilakukan berdasarkan standar SNI 1969:2008. Geopolimer dikeringkan kedalam oven pada temperatur 50°C selama 24 jam, lalu ditimbang beratnya (W_0). Kemudian tersebut direndam kedalam aquades selama 24 jam. Lalu air yang berada dalam permukaan geopolimer tersebut dibersihkan, dan sampelnya ditimbang kembali (W_1). Sehingga air yang terserap dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.1.

$$A_w = \frac{(w_1 - w_0)}{w_0} \times 100\% \quad 3.1$$

3.4.5 Pengujian XRF

Uji XRF adalah salah satu metode analisis yang digunakan untuk menganalisis unsur dalam suatu sampel atau bahan secara kualitatif. Prinsip kerja metode analisis XRF berdasarkan terjadinya tumbukan atom-atom pada permukaan sampel oleh sinar-X dari sumber sinar-X. Hasil analisis kualitatif ditunjukkan oleh spektrum yang mewakili jenis unsur yang sesuai dengan energi sinar-X sedangkan untuk analisa kuantitatif diperoleh dengan membandingkan sampel dengan standar.

3.4.6 Pengujian Densitas

Pengujian densitas dilakukan dengan mengukur densitas dari geopolimer hasil cetakan berdasarkan Rumus 3.2. Pengujian densitas geopolimer dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Benda uji ditimbang dan hasilnya dicatat sebagai massa (m)
- b. Benda uji dihitung volumenya dan dicatat sebagai (V)

- c. Densitas geopolimer dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 3.2$$

Dimana:

ρ : densitas (kg/m^3)

m : massa benda uji kering di udara (g)

V : volume (cm^3)

3.5 Rancangan Penelitian

Untuk memperoleh data yang sistematis, maka dari penelitian ini akan dibuat rincian komposisi penelitian seperti pada Tabel 3.1, dengan rancangan penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Rincian komposisi spesimen tiap variabel

Sampel	Curing	Rasio FA : Slag	Komposisi			
			Fly Ash	Slag	Basa Aktivator	
	(°C)	(%wt)	(gram)	(gram)	NaOH (gram)	Na ₂ SiO ₃ (gram)
Sampel A		80:20	208	52	48	60
Sampel B	30	75:25	195	65	48	60
Sampel C		70:30	182	78	48	60
Sampel D		80:20	208	52	48	60
Sampel E	55	75:25	195	65	48	60
Sampel F		70:30	182	78	48	60

Tabel 3.2 Rancangan penelitian

Material	Pengujian					
	Uji Tekan	Uji <i>Microscope</i>	Uji XRD	Uji XRF	Uji Daya Serap Air	Uji Densitas
Sampel A	✓	✓	✓		✓	✓
Sampel B	✓	✓	✓		✓	✓
Sampel C	✓	✓	✓		✓	✓
Sampel D	✓				✓	✓
Sampel E	✓				✓	✓
Sampel F	✓				✓	✓
<i>Fly Ash</i>				✓		
<i>Slag</i>				✓		

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Awal

4.1.1 Komposisi Kimia *Fly Ash*

Sebelum memulai proses pembuatan geopolimer dilakukan karakterisasi awal pada *fly ash* dengan menggunakan alat uji XRF (*X-ray fluorescence*) untuk dapat mengetahui komposisi kimia dari abu layang. Persentase unsur-unsur penting yang dihasilkan oleh analisis XRF dilampirkan dalam bentuk oksidanya seperti SiO_2 , Al_2O_3 , CaO dan Fe_2O_3 . Komponen-komponen oksida pada abu layang sangat mempengaruhi hasil dari sintesis geopolimer. Selanjutnya, dari hasil analisis ini dapat menentukan kategori abu layang termasuk dalam tipe C atau tipe F. Sesuai dengan ASTM C618 abu layang dibagi menjadi dua kategori yaitu tipe F dan tipe C, dikatakan tipe F apabila jumlah $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ dan kategori tipe C apabila jumlah $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 70\%$. Komposisi kimia dari abu layang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Komposisi kimia abu layang

No.	Senyawa	Kandungan (%)
1.	Al_2O_3	16,7
2.	SiO_2	43,2
3.	K_2O	1,17
4.	CaO	3,9
5.	TiO_2	1,96
6.	V_2O_5	0,084
7.	Cr_2O_3	0,051
8.	MnO	0,34
9.	Fe_2O_3	28,5
10.	NiO	0,055
11.	CuO	0,04
12.	ZnO	0,08
13.	MoO_3	3,39
14.	BaO	0,2
15.	Re_2O_7	0,3

Berdasarkan hasil analisis komposisi kimia menggunakan XRF dapat disimpulkan bahwa abu layang yang digunakan termasuk ke dalam tipe F. Abu layang tipe F memiliki *self-hardening* yang baik sehingga mudah mengeras dan geopolimer terbaik hanya dapat dihasilkan dari abu layang tipe F (Zerfu & Ekaputri, 2016). Kandungan-kandungan kimia pada abu layang, utamanya SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , dan Fe_2O_3 , diharapkan memberikan efek tertentu khususnya pada kuat tekan geopolimer. SiO_2 diperlukan untuk inisiasi pembentukan oligomer dan polikondensasi silikat yang dapat meningkatkan efisiensi geopolimerisasi (Panias, *et al.*, 2007), sedangkan Al_2O_3 berperan dalam pembentukan awal inti geopolimer karena Al_2O_3 sebagai penghubung antar oligomer silikat yang akan membentuk struktur tiga dimensi. Secara umum, kandungan alumunium dalam bahan sumber silikat-alumina mengendalikan sejumlah besar sifat geopolimer termasuk stabilitas jaringan geopolimer yang mempengaruhi kekuatan tekan dan daya tahan. Hasil dari komposisi kimia SiO_2 dan Al_2O_3 juga dapat memberikan perbandingan Si/Al yang mampu mencapai kuat tekan maksimal pada geopolimer. Perbandingan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 3$ dapat menghasilkan kuat tekan yang maksimum (Hadi, *et al.*, 2018). Perbandingan yang didapat pada $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang didapat pada geopolimer ini adalah sebesar 2,58 yang artinya masih rendah dan sulit untuk mendapatkan kuat tekan maksimum.

Adanya kandungan CaO dalam abu layang dapat menyebabkan pasta geopolimer cepat mengeras. Tingginya CaO tidak hanya menyebabkan reaksi polimerisasi tapi juga reaksi hidrasi yang meningkatkan kuat tekan (Risdanareni, *et al.*, 2017). Hidrasi abu layang yaitu pembentukan material geopolimer yang terjadi dari reaksi antara CaO bebas dengan Al_2O_3 , SiO_2 melibatkan air. Komposisi CaO dalam abu layang berpengaruh dalam pengerasan awal karena CaO dapat membentuk kalsium silikat yang amorf, seperti yang terdapat pada semen portland (OPC). Pada abu layang ini persentase CaO cukup rendah sehingga pasta akan butuh waktu yang lebih lama untuk mengeras dan tidak

mampu meningkatkan kuat tekan yang terlalu signifikan. Kandungan lain yang perlu diperhatikan yaitu Fe_2O_3 , besi akan bereaksi dengan ion hidroksida yang terdapat dalam larutan basa untuk membentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Namun disini lain ion hidroksida ini sangat diperlukan untuk pelarutan silika dan alumina dari abu layang sehingga silika dan alumina terlarut yang diperlukan pada geopolimerisasi menjadi lebih sedikit (Muslihah, 2008). Jumlah Fe_2O_3 pada abu layang yang digunakan cukup banyak sehingga geopolimer akan mengalami kekurangan ion hidroksida dalam pelarutan silika dan alumina sehingga menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan yang rendah.

4.1.2 Komposisi Kimia *Slag*

Uji XRF juga dilakukan pada *slag* untuk mengetahui kandungan dari *slag* yang diuji dengan menggunakan energi 30 KV dengan medium udara. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa komposisi tiga unsur tertinggi yang ditunjukkan dalam bentuk oksidanya yaitu Aluminium oksida (Al_2O_3) sebesar 85,5%, Kalsium oksida (CaO) sebesar 4,67% dan Ferioksida (Fe_2O_3) sebesar 4,7%. Unsur-unsur tersebut berperan penting dalam pembentukan geopolimer terutama Al_2O_3 yang menjadi aluminat ketika reaksi geopolimerisasi berlangsung dan kemudian membentuk rantai polimer dengan silikat. Hasil karakterisasi dari *slag* ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Komposisi kimia *slag*

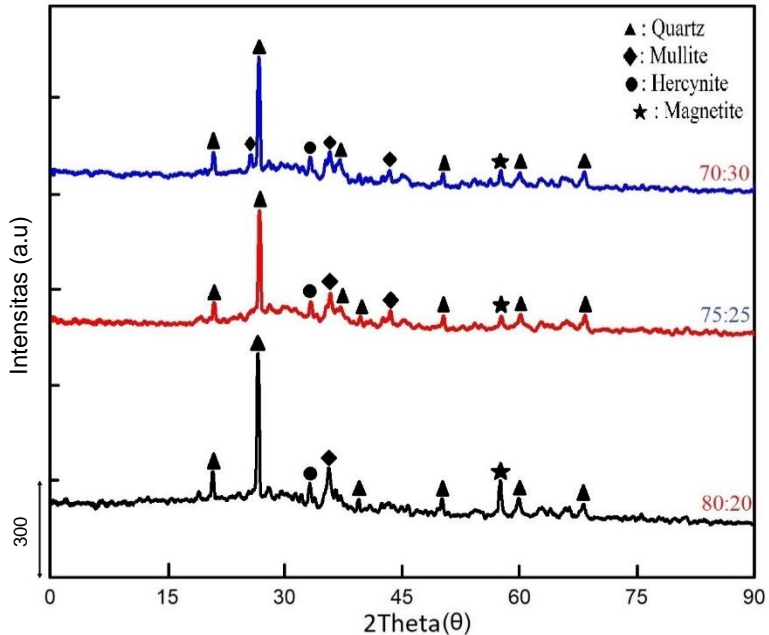
No.	Senyawa	Kandungan (%)
1.	Al_2O_3	85,4
2.	P_2O_5	0,9
3.	K_2O	1,65
4.	CaO	4,69
5.	TiO_2	0,7
6.	V_2O_5	0,1
7.	Cr_2O_3	0,23
8.	MnO	0,602

No.	Senyawa	Kandungan (%)
9.	Fe ₂ O ₃	4,71
10.	NiO	0,031
11.	CuO	0,369
12.	ZnO	0,298
13.	SrO	0,18
14.	ZrO ₂	0,17

Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.2 persentase unsur CaO juga tidak banyak yang menyebabkan pasta geopolimer membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mengeras dan tidak mampu memberikan tambahan kuat tekan yang signifikan.

4.2 Hasil Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD)

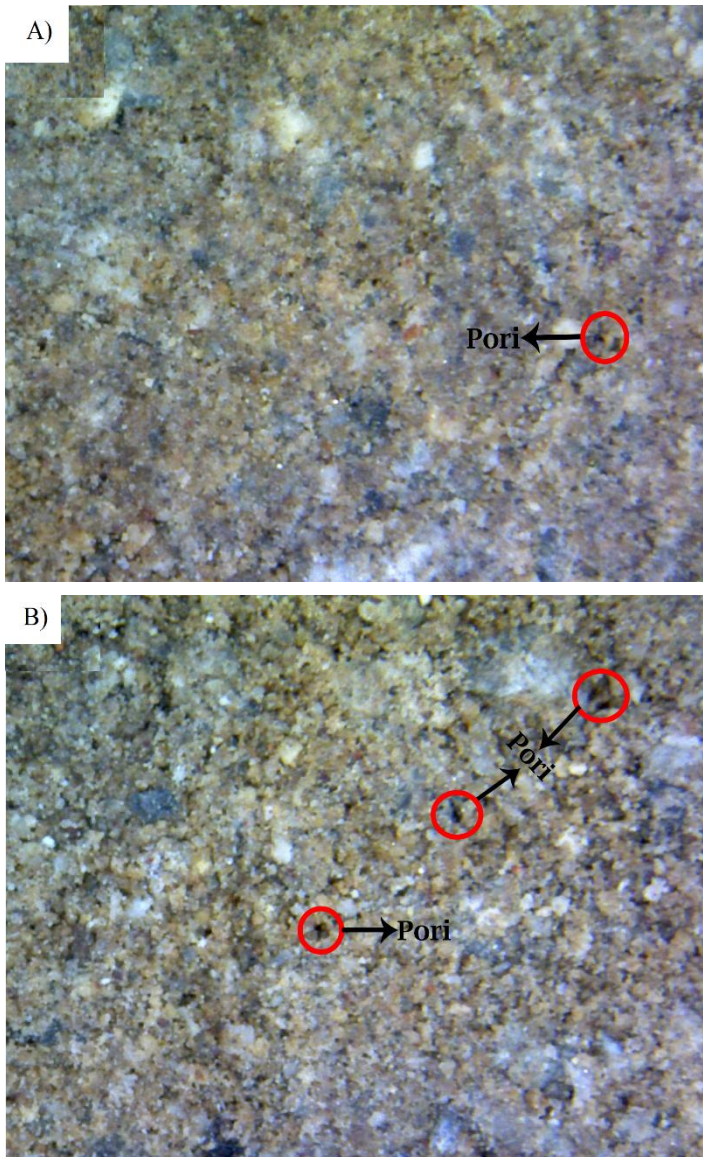
Pada penelitian ini karakterisasi dengan XRD dilakukan pada sampel geopolimer, pada sampel geopolimer karakterisasi XRD dilakukan untuk mengetahui komposisi senyawa yang terbentuk. Puncak khas geopolimer mirip seperti puncak-puncak yang muncul pada abu layang yaitu munculnya fasa quartz pada 2θ : 20,87°, 26,66°, 39,44°, 50,18°, 60° dan 68,11° [ICDD (01-085-0794)] dan fasa mullite pada 2θ : 16,4°, 25,9°, 26,18°, 33,19°, 40,79°, 60,54° [ICDD (01-089-2814)]. Gambar 4.1 adalah difaktogram dari sampel geopolimer dengan rasio 70:30, 75:25, dan 80:20, hasil difaktogram menunjukkan pola yang sama dimana, untuk puncak yang paling khas dari geopolimer berbasis abu layang terdapat pada 2θ : 26,6° dan juga muncul pada 2θ : 20,8° yang terdapat pada tiap-tiap sampel. Puncak mullite (3Al₂O₃.SiO₂) terlihat pada 2θ : 33,14° dan fasa mullite juga muncul pada 2θ : 40,63° Puncak-puncak difraksi dari hasil XRD didominasi oleh fasa quartz, masih terdapat banyak fasa kristalin yang ditandai dengan adanya puncak-puncak tajam, sedangkan fasa amorf ditandai dengan adanya gundukan. Pada pembuatan geopolimer tidak semua Si dan Al pada abu layang dan *slag* larut ke dalam larutan aktivator, hanya Si dan Al dalam fasa amorf yang lebih mudah terlarut dalam basa kuat (Xu & van Deventer, 2002).

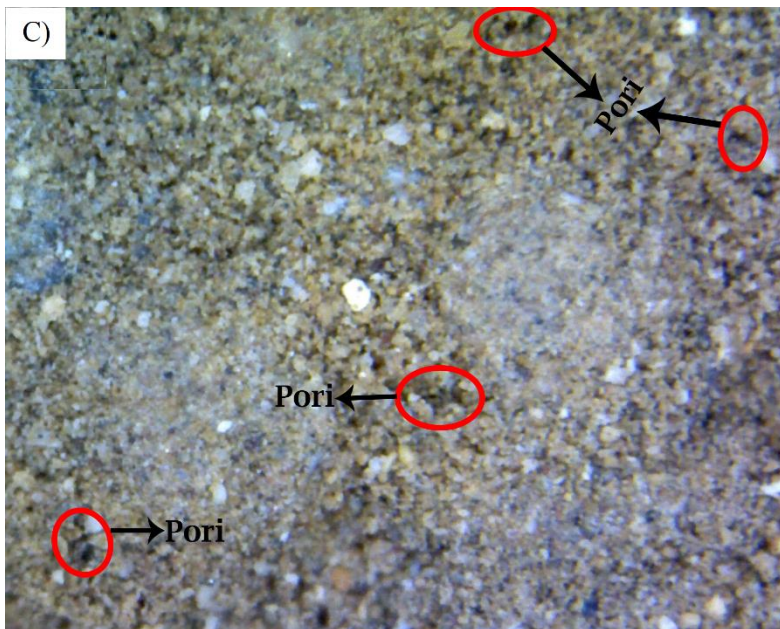


Gambar 4.1 Hasil XRD sampel geopolimer

Pada Gambar 4.1 di atas dapat dilihat fasa *quartz* (ditandai dengan ▲), *mullite* (ditandai dengan ◆), *hercynite* (ditandai dengan ●), *magnetite* (ditandai dengan ★). Adanya gundukan ini menandakan adanya perubahan dari fasa kristal menjadi fasa amorf baru akibat adanya penambahan NaOH dan Na₂SiO₃. Hal ini menandakan geopolimer telah berhasil dibentuk dengan munculnya amorf baru akibat adanya pelarutan silika dan alumina amorf dan pelarutan sedikit kristal *quartz* dan *mullite* pada abu layang dan *slag* oleh larutan basa aktivator (Xu & van Deventer, 2002).

4.3 Analisa Morfologi *Microscope Digital*





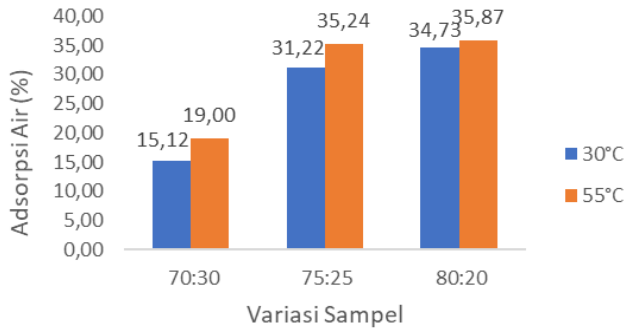
Gambar 4.2 Hasil pengamatan mikroskop morfologi geopolimer rasio A) 70:30, B) 75:25 dan C) 80:20 dengan perbesaran 370X

Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengamatan pada sampel geopolimer dengan beberapa rasio. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *software* imageJ menunjukkan pada gambar A dapat dilihat untuk rasio 70:30 pada perbesaran 370X memiliki pori yang sedikit seperti ditunjukkan anak panah pada gambar A dengan persen area pori yang terbentuk sebesar 0,215 %. Jika kita lihat pada gambar B untuk rasio 75:25 tampak pori yang terbentuk lebih banyak dibandingkan gambar A karena persen area pori yang ada sebesar 0,656 %. Hal yang sama terjadi pada gambar C untuk rasio 80:20 dengan pori yang dihasilkan lebih banyak dibandingkan gambar B dan A dengan area pori yang terbentuk sebesar 0,717 %. Hal ini dikaitkan dengan kurang baiknya mixing dan reaksi yang

terjadi sehingga ketika proses pencetakan sampel mengering terlalu cepat dan menyebabkan kekerasan dan porositas. Distribusi dari ukuran partikel abu layang memainkan peranan penting dalam sifat mekanik geopolimer yang dihasilkan. Pada umumnya bentuk morfologi dari abu layang ini adalah bola dengan ukuran partikel antara 1-100 μm . Ukuran yang berbeda-beda pada morfologi abu layang adalah disebabkan karena saat melewati daerah pembakaran (*burning zone*) pada pabrik-pabrik partikel batubara mengalami perubahan sifat kimia dan fisika yang berbeda-beda (Supriadi, *et al.*, 2016).

4.4 Pengujian Penyerapan Air (*Water Absorption*)

Nilai penyerapan air merupakan salah satu parameter penting untuk diuji, hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui permeabilitas dan tingkat reaksi dari geopolimer agar memudahkan perencanaan dan pengaplikasian geopolimer pada bahan bangunan. Pada penelitian ini telah dilakukan uji penyerapan air geopolimer berbasis abu layang dan ditambahkan dengan *slag* aluminium dengan rasio 70:30, 75:25, 80:20 serta rasio temperatur pada geopolimer umur 28 hari. Pengujian hanya dilakukan pada geopolimer berumur 28 hari dikarenakan pada umur 28 hari proses polimerisasi pada geopolimer diperkirakan telah berlangsung secara sempurna dibandingkan dengan umur sebelum 28 hari (Malik, 2016), adapun setelah 28 hari tidak ada perubahan signifikan yang terjadi pada sifat fisik geopolimer.



Gambar 4.3 Grafik penyerapan air pada geopolimer dengan rasio sampel 70:30, 75:25, dan 80:20

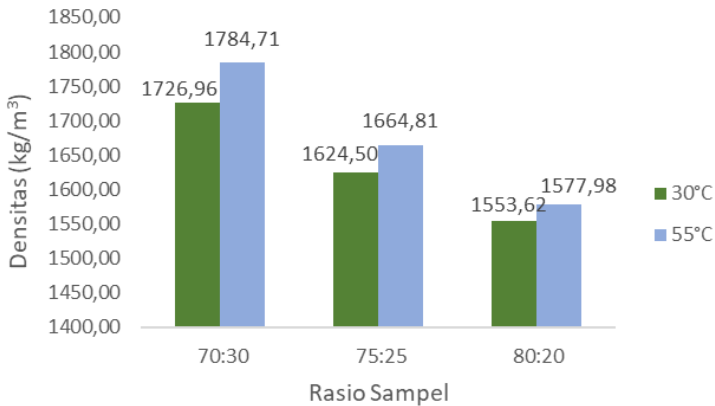
Dapat dilihat pada Gambar 4.3 bahwa nilai penyerapan air geopolimer dengan rasio temperatur *curing* dan rasio perbandingan *fly ash* : *slag* menunjukkan peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur dan massa *slag* pada sampel. Peningkatan terbesar terjadi pada sampel 80:20 dengan temperatur 55 °C yaitu dengan nilai penyerapan sebesar 35,87 %, lalu pada temperatur 30 °C diperoleh kenaikan sebesar 34,73 %. Pada rasio 75:25 dengan temperatur 55 °C dengan penyerapan air sebesar 35,24 % serta pada temperatur 30 °C memperoleh nilai sebesar 31,21 %. Selanjutnya pada rasio 70:30 dengan temperatur 55 °C dan 30 °C berturut-turut memiliki nilai penyerapan air terendah sebesar 19,00 % dan 15,12 %. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nilai penyerapan air seperti tingkat kandungan air awal yang ada di dalam sampel serta dipengaruhi juga oleh keberadaan pori dalam sampel. Serapan air merupakan fungsi dari porositas dan ukuran pori, sehingga semakin banyak jumlah pori dan semakin besar ukuran pori yang terbentuk maka nilai penyerapan air juga akan semakin besar demikian pula sebaliknya (Lamond & Pielert, 2006). Jika melihat hasil yang diperoleh pada

pengamatan *Microscope Digital* yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya, maka meningkatnya nilai serapan air pada geopolimer dengan temperatur *curing* yang lebih tinggi disebabkan oleh keberadaan pori dengan jumlah yang lebih banyak dalam geopolimer sehingga kapasitas untuk menyerap air juga semakin banyak. Sedangkan pada temperatur yang lebih rendah jumlah pori yang terbentuk lebih sedikit dengan ukuran relatif lebih kecil sehingga kapasitasnya dalam menyerap air lebih sedikit.

Nilai penyerapan air yang baik pada *concrete* atau beton adalah sebesar 3-6 % (Sugiharto, *et al.*, 2000). Hal ini menunjukkan peningkatan nilai serapan yang terlalu tinggi pada geopolimer mengakibatkan geopolimer belum sesuai dengan standar *concrete* untuk bahan bangunan. Kenaikan nilai yang besar ini disebabkan oleh banyaknya porositas yang muncul akibat kompaksi yang kurang baik pada sampel saat proses pencetakan, sehingga ketika dilakukan pengujian, air yang masuk ke dalam sampel jadi lebih banyak sehingga menyebabkan nilai penyerapan air pada sampel menjadi sangat tinggi.

4.5 Pengujian Densitas

Selain nilai serapan air, sifat fisik yang perlu diketahui juga agar memudahkan geopolimer untuk dapat dipakai sebagai bahan bangunan adalah nilai densitas. Hasil uji densitas geopolimer berbahan dasar abu layang dengan ditambahkan *slag* aluminium berdasarkan Rumus 3.2 pada dua variasi temperatur dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Nilai densitas geopolimer berbasis FA rasio 70:30, 75:25 dan 80:20

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa sampel geopolimer dengan rasio 70:30 pada temperatur 30 °C memperoleh nilai densitas sebesar 1726,96 kg/m³. Pada temperatur *curing* 55 °C selama 24 jam dapat dilihat bahwa grafik mengalami *trend* yang sama yaitu peningkatan nilai densitas pada setiap rasio, dapat dilihat pada temperatur 55 °C dengan rasio 70:30 dengan densitas sebesar 1784,71 kg/m³. Selanjutnya pada sampel rasio 75:25 dengan temperatur 30 °C geopolimer mengalami penurunan densitas dengan nilai sebesar 1624,50 kg/m³ dan pada temperatur *curing* 55 °C memperoleh nilai densitas sebesar 1664,81 kg/m³. Kemudian pada sampel rasio 80:20 geopolimer memperoleh densitas terendah dengan densitas sebesar 1553,62 kg/m³ Selanjutnya pada temperatur *curing* 55 °C dihasilkan densitas sebesar hari dengan nilai sebesar 1577,98 kg/m³.

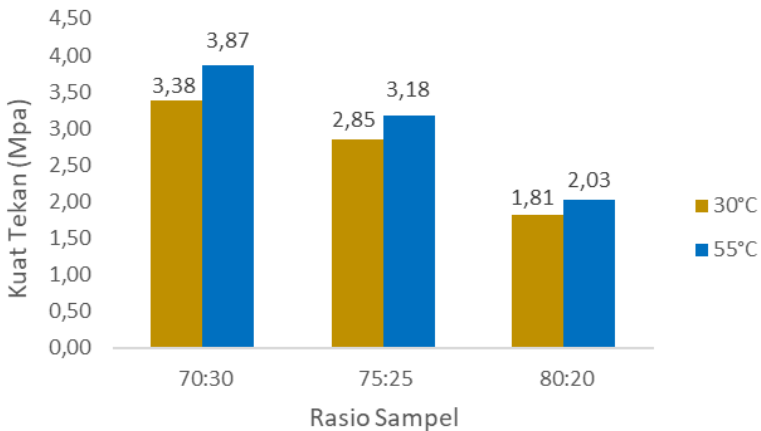
Berdasarkan Gambar 4.4 secara umum nilai densitas mengalami peningkatan akibat meningkatnya temperatur *curing*. Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur yang lebih tinggi

proses geopolimerisasi terjadi secara optimal sehingga gel geopolimer yang terbentuk semakin banyak (Malik, 2016). Dari pengujian densitas yang dilakukan, nilai densitas pada temperatur 55 °C memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan densitas pada 30 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pada temperatur 55 °C proses polikondensasi terjadi dengan optimal untuk membentuk jaringan aluminosilikat yang lebih banyak sehingga mampu meningkatkan nilai densitas pada geopolimer. Densitas yang rendah pada temperatur 30 °C disebabkan oleh proses polikondensasi untuk pembentukan jaringan aluminosilikat tidak mampu berjalan optimal dan menyisakan konten air dalam geopolimer sehingga banyak abu layang dan *slag* yang belum terikat dengan basa aktivator. Namun, peningkatan temperatur yang berlebihan juga mampu menurunkan nilai densitas disebabkan oleh proses penguapan dalam geopolimer berlangsung lebih cepat dibandingkan dengan proses polikondensasi sehingga proses geopolimerisasi tidak maksimum dan menyebabkan porositas yang terjadi semakin tinggi (Temuujin, *et al.*, 2009). Terlihat bahwa rasio sampel 70:30 memiliki nilai densitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan rasio sampel yang lain dan rasio 80:20 adalah sampel yang mempunyai densitas paling rendah. Hal ini dapat dikaitkan dengan rasio penambahan *slag* pada geopolimer yang juga mampu meningkatkan nilai densitas karena mampu memberikan penambahan massa.

4.6 Pengujian Kuat Tekan (*Compressive Strength*)

Geopolimer dengan kualitas yang baik adalah yang mempunyai sifat mekanik yang baik pula, di antara sifat mekanik yang sering menjadi acuan untuk menentukan kualitas geopolimer adalah kekuatan tekan. Geopolimer dengan umur 7, 14, 28 hari akan dilakukan pengujian kekuatan tekan, pengaruh umur geopolimer terhadap hasil kuat tekan yang diperoleh yaitu semakin lama umur geopolimer diharapkan semakin meningkatkan nilai kuat tekan karena pembentukan rantai C-A-S-H (Calcium-aluminosilikat-hidrat) yang terjadi dalam geopolimer semakin

panjang (Muslihah, 2008). Pengukuran kuat tekan geopolimer dihentikan pada umur 28 hari, hal ini dilakukan karena kuat tekan geopolimer memiliki nilai optimum pada umur 28 hari. Selain itu pada umur 28 hari proses kondensasi yang terjadi diperkirakan sudah berlangsung secara sempurna jika dibandingkan dengan geopolimer dengan usia sebelum 28 hari (Malik, 2016). Adapun hasil dari nilai kuat tekan geopolimer selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik kuat tekan geopolimer berbasis FA dengan rasio 70:30, 75:25 dan 80:20

Dapat dilihat dari Gambar 4.5 pada rasio sampel 70:30 dengan temperatur *curing* 30 °C geopolimer menghasilkan nilai kuat tekan sebesar 3,38 MPa, Selanjutnya pada temperatur 55 °C geopolimer mengalami peningkatan kuat tekan dengan nilai sebesar 3,87 MPa. *Trend* yang sama juga berlangsung pada geopolimer dengan rasio 72:25 yaitu dengan bertambahnya temperatur *curing* nilai kuat tekan juga meningkat. Seperti yang dapat dilihat pada temperatur 30°C sampel memperoleh kuat tekan sebesar 2,85 MPa, begitu pula pada temperatur 55 °C diperoleh nilai kuat tekan yang meningkat sebesar 3,182 MPa. Pada sampel

80:20 geopolimer memiliki nilai kuat tekan terendah pada berbagai variasi temperatur dengan temperatur 30 °C sebesar 1,812 MPa dan pada temperatur 55 °C sebesar 2,033 MPa. Hal ini disebabkan hasil pencetakan geopolimer ke dalam cetakan tidak rata dan pengampelasan yang kurang baik sehingga tidak menghasilkan kuat tekan maksimal.

Berdasarkan Gambar 4.5 umumnya nilai kuat tekan meningkat dengan penambahan temperatur *curing*, hal ini menunjukkan bahwa proses geopolimerisasi melaju lebih cepat dan optimal di temperatur yang lebih tinggi sehingga membentuk gel geopolimer yang lebih banyak sehingga mampu mengikat lebih banyak abu layang. Nilai kuat tekan juga meningkat seiring dengan penambahan umur geopolimer, hal ini disebabkan geopolimer terus menghasilkan reaksi geopolimerisasi sampai umur 28 hari akan tetapi setelah umur 28 hari reaksi geopolimerisasi masih berlangsung namun sangat kecil dan tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap nilai kuat tekan geopolimer. Nilai kuat tekan yang diperoleh juga sangat rendah jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Kim & Kim, 2012) dimana geopolimer yang dihasilkan mampu mencapai kuat tekan sebesar 44 MPa dikarenakan *fly ash* dan *slag* yang digunakan memiliki kandungan CaO yang tinggi, seperti yang diketahui adanya kandungan CaO dalam abu layang dapat menyebabkan pasta geopolimer cepat mengeras karena dapat membentuk kalsium silikat yang amorf, seperti yang terdapat pada semen portland (OPC). Tingginya CaO tidak hanya menyebabkan reaksi polimerisasi tapi juga reaksi hidrasi yang meningkatkan kuat tekan pada geopolimer (Risdanareni, *et al.*, 2017). Selain itu rasio SiO₂/Al₂O₃ yang dimiliki oleh *fly ash* hanya sebesar 2,58, rasio yang baik untuk mendapatkan nilai kuat tekan maksimum adalah rasio SiO₂/Al₂O₃ : 3 karena mampu menghasilkan ikatan polimer yang mempunyai *cross link*.

Hasil yang diperoleh pada nilai kuat tekan pada penelitian ini sangat jauh dari yang diharapkan dimana geopolimer yang ingin

digunakan sebagai pengganti semen pada konstruksi tidak menghasilkan sifat mekanik yang sesuai. Kuat tekan yang harus dimiliki untuk pasta sebagai bahan konstruksi adalah sebesar 20 MPa (ASTM C150-02a, 2002). Akibatnya penggunaan geopolimer tidak dapat menggantikan 100 % semen pada penggunaan untuk bahan konstruksi, akan tetapi dapat menggantikan sebagian dari semen yang digunakan dalam proses pembuatan bahan konstruksi seperti beton, dinding dan lain-lain. Untuk dapat menggantikan semen seutuhnya maka geopolimer harus memiliki sifat mekanik maupun fisik yang sesuai dengan standar yang telah ditetapkan demi keamanan bangunan konstruksi yang dibangun.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Sintesis geopolimer berbahan dasar abu layang dan *slag* dengan rasio sampel 70:30, 75:25, dan 80:20 %wt telah berhasil dilakukan melalui proses geopolimerisasi menggunakan larutan aktivator NaOH dan Na₂SiO₃ dengan variasi temperatur *curing*. Dari hasil pengamatan mikroskop pori dalam jumlah lebih banyak yang terbentuk akibat peningkatan temperatur mempengaruhi sifat fisik geopolimer, dimana nilai penyerapan air semakin meningkat seiring dengan peningkatan temperatur *curing*. Akibatnya geopolimer menyerap air lebih banyak dengan penyerapan air terbesar pada rasio *fly ash/slag* 80:20 sebesar 35,87 %. Nilai densitas meningkat seiring dengan kenaikan temperatur dan rasio *slag* yang ada pada geopolimer dengan nilai densitas terbesar 1784,71 kg/m³. Sifat mekanik berupa kekuatan tekan juga dipengaruhi oleh kenaikan temperatur dan rasio *slag*. Kekuatan maksimum dari geopolimer diperoleh pada kondisi temperatur *curing* 55 °C dengan rasio *slag* sebesar 30% dengan nilai sebesar 3,87 Mpa, karena pada kondisi ini jumlah gel aluminosilikat yang dihasilkan lebih banyak sehingga mengikat geopolimer lebih baik dan kuat. Sedangkan pada temperatur 30 °C dengan rasio *slag* 20 % menghasilkan kuat tekan terendah dengan nilai 1,81 Mpa, ini disebabkan karena proses polikondensasi tidak berlangsung optimal sehingga menyebabkan kekuatan tekan menjadi rendah akibat geopolimer lebih rapuh.

5.2 Saran

Mengingat banyaknya variabel dari proses sintesis yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan mekanik serta aplikasi yang beragam dari geopolimer maka beberapa saran yang perlu diperhatikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Menggunakan bahan baku yang memiliki kandungan Si dan Al serta Ca yang lebih banyak dan memiliki rasio Si:Al > 3

sehingga dapat menghasilkan geopolimer dengan sifat fisik dan mekanik yang lebih baik.

2. Temperatur, waktu *curing* dan banyaknya larutan aktivator juga perlu diperhatikan dalam proses sintesis geopolimer untuk meningkatkan sifat fisik dan mekanik geopolimer.
3. Menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mendapatkan analisis yang lebih baik dalam morfologi struktur geopolimer maupun bahan baku yang digunakan.
4. Dalam perencanaan untuk aplikasi geopolimer dengan sifat fisik dan mekanik yang berbeda harus disesuaikan dengan lingkungan penggunaannya seperti kelembaban dan kandungan air untuk meningkatkan usia penggunaan geopolimer.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiputro, S. T., 2013. **Campuran Geopolimer Fly Ash Sebagai Material Mortar Perbaikan**, Bandung: Politeknik Negeri Bandung.
- ASTM C39-86, "Standart for Testing Compressive Strength", **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org
- ASTM C150-02a, "Standard Specification for Portland Cement", **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2002, www.astm.org
- Bakharev, T., 2005. "Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash And Elevated Temperature Curing". **Cement And Concrete Research**, 36(6), pp. 1224-1232.
- Buchwald, A., Zellman, H. D. & Kaps, C., 2011. "Condensation Of Aluminosilicate Gels—Model System For Geopolymer Binders". **Journal Non-Crystalline Solids**, Volume 357, pp. 1376-1382.
- Davidovits, J., 1991. **J. Therm. Anal**, 37(8), pp. 1633-1656.
- Davidovits, J., 1994. "Inorganic Polymeric New Materials". **J. Mater. Educ**, Volume 16, pp. 91-139.
- Davidovits, P. J., 2002. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications Market Trends and potential Breakthroughs**. s.l., Geopolymer 2002 Conference.
- Duxson, P., Provis, L., Lukey, G. C. & Van Deventer, J. S. J., 2007. "The Role Of Inorganic Polymer Technology In The Development Of 'Green Concrete'". **Cement And Concrete Research Dan Concrete Research**, Volume 37, pp. 1590-1597.
- Enviromental Agency Protection, 2002. **European Waste Catalogue and Hazardous Waste List**. Ireland: Enviromental Agency Protection.
- Fansuri, H., Swastika, N. & Atmaja, L., 2008. "Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton". **Akta Kimindo**, 3(2), pp. 61-66.

-
- Hadi, M. S., Al-Izzawi, M. & Yu, T., 2018. "Effect of Fly Ash Characteristic and Alkaline Activator Components On Compressive Strength Of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar". **Construction and Building Materials**, Volume 175, pp. 41-54.
- Haikal, F., Ashadi, H. W. & Nazech, E. M., 2014. **Studi Pemanfaatan Limbah Steel Slag Sebagai Substitusi Agregat Dalam Pembuatan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash**, Depok: Universitas Indonesia.
- Harijono, 2006. "Fly Ash dan Pemanfaatannya". **Seminar Nasional Batubara**.
- Joulazadeh, M. H. & Joulazadeh, F., 2010. "Slag; Value Added Steel Industry Byproducts". **Archives of Metallurgy And Materials**, 55(4), pp. 1137-1144.
- Khale, D. & Chaudhary, R., 2007. "Mechanism Of Geopolymerization And Factors Influencing Its Development: A Review". **J. Mater. Science**, pp. 729-746.
- Kim, H. & Kim, Y., 2012. "Characteristics of the Geopolymer using Fly Ash and Blast Furnace Slag with Alkaline Activators". **International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering**, 43(32), pp. 154-159.
- Komljenovic, M., 2015. **Mechanical Strength And Young's Modulus Of Alkali-Activated Cement-Based Binders**. Woodhead Publishing.
- Komnitsas, K. A., 2011. "Potential Of Geopolymer Technology Towards Green Buildings And Sustainable Cities". **Proc. Eng**, Volume 21, pp. 1023-1032.
- Lamond, J. F. & Pielert, J. H., 2006. "Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials STP 169D". **ASTM International 100 Barr Harbor Drive**, pp. 436-448.
- Leong, H. Y., Ong, D. E., Sanjayan, J. G. & Nazari, A., 2016. The "Effect of Different Na₂O and K₂O Ratios of Alkali Activator on Compressive Strength of Fly Ash Based-
-

-
- Geopolymer". **Construction and Building Materials**, Issue 106, pp. 500-511.
- Llyod, N. A. & Rangan, B. V., 2010. **Geopolymer Concrete With Fly Ash**, Australia: Curtin University of Technology.
- Malik, Y., 2016. **Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Curing Terhadap Sifat Fisik – Mekanik Semen Geopolimer Berbasis Slag Ferronickel**, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Manuahe, R., Sumajouw, M. D. & Windah, R. S., 2014. **Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash)**. pp. 277-282.
- Mezhov, A., 2019. "Influence of Mechanical Activation of Fly-Ash in Presence of Polynaphthalene Sulfonat Superplastisizer on Rheology and Hydration Kinetics of Cement- Fly Ash Pastes". Dalam: **Construction and Building Materials 210**. s.l.:Elsevier, pp. 380-390.
- Muslihah, 2008. **Sintesis dan Karakterisasi Geopolimer dari Campuran Abu Layang PT. Semen Gresik Jawa Timur dan PLTU Asam-Asam Kalimantan Selatan**, Surabaya: Program Magister Kimia Jurusan Kimia FMIPA ITS.
- nationalslag.org, 2013. **Common Uses for Slag**, Pennsylvania: National Slag Association.
- Nicolas, R. S., Walkley, B. & van Deventer, J., 2017. "Fly Ash Based Geopolymer Chemistry and Behavior". Dalam: **Coal Combustion Products (CCP's)**. Cambridge: Woodhead Publishing, pp. 185-214.
- Nugraha, S., 2017. **Dewan Energi Nasional: Outlook Energi Indonesia 2016**. Jakarta: Kementrian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Olawale, M. D., 2013. "Synthesis, Characterization and Binding Strength of Geopolymers: A Review". **International Journal of materials Science and Applications**, 2(6), pp. 185-193.
-

-
- Palomo, A., Grutzeck, M. W. & Blanco, M. T., 1999. "Alkali Activated Fly Ashes: A Cement For The Future". **Cement and Concrete Research**, Issue 29, pp. 1323-1329.
- Panias, D., Giannopoulou, I. P. & Perraki, T., 2007. "Effect of Synthesis Parameters on Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymers". **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 301(1-3), pp. 246-254.
- Provis, J. L. & van Deventer, J. S. J., 2009. **Geopolymer: structure, Processing, Properties and Industrial Application**, Abingdon, Woodhead Publishing.
- Putra, A. K., Wallah, S. E. & Dapas, S. O., 2014. "Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Berbasis Abu Layang (Fly Ash)". **Jurnal Sipil Statik**, 2(7), pp. 330-336.
- Rahier, H., 2007. "Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers". **J. Mater. Sci**, Volume 42, pp. 2982-2996.
- Rini, D. S., 2019. **Dampak Pencemaran Limbah B3 Slag Aluminium Akibat Kegiatan Industri Peleburan Dross Aluminium Di Jombang**, Jawa Timur: ecoton.or.id.
- Risdanareni, P., Umniati, B. S. & Zein, F. Z., 2017. Workability "Enhancement of Geopolymer Concrete Through The Use of Retarder". **Green Construction and Engineering Education For Sustainable Future AIP Conf.**, Issue 1887, pp. 1-9.
- SNI 15-2049-2015, 2015. **Semen Portland**, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional
- Sugiharto, H., Kusuma, G. H., Pranoto, H. & Sarjimin, R., 2000. "Pengukuran Kadar Air Agregat Dan Beton Segar Dengan Menggunakan Microwave Oven". **Dimensi Teknik Sipil**, 2(1), pp. 22-36.
- Supriadi, W. et al., 2016. "The Effect of Pb²⁺ and Cd²⁺ Addition to Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Paste". **Materials Science Forum**, pp. 178-185.
-

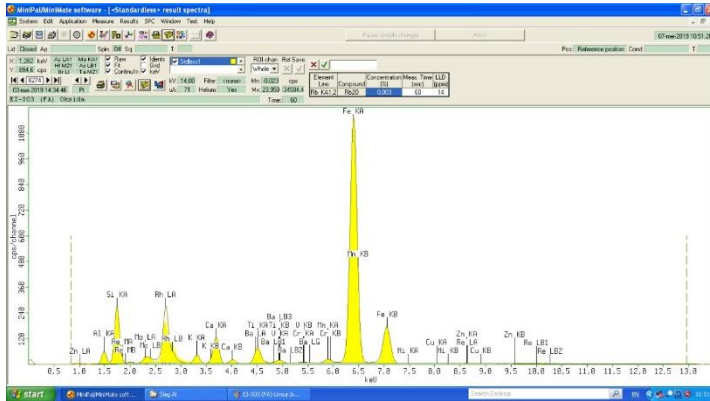
-
- Temuujin, J., van Riessen, A. & Williams, R., 2009. "Influence of Calcium Compounds on The Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes". **Journal of Hazardous Materials**, Volume 167, pp. 82-88.
- Tjokrodimuljo, K., 1995. **Teknologi Beton**. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada
- Tjokrodimuljo, K., 1998. **Buku Ajar Bahan Bangunan**. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada
- Uyun, F. M., 2018. **Analisis Peran Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Jawa Timur Dalam Pengawasan Pencemaran Limbah B3 Industri Slag Aluminium Di Kabupaten Jombang**, Surabaya: Uin Sunan Ampel.
- van Vlack, L. H., **Elements of Material Science and Engineering**. Jakarta: Erlangga.
- Wardani, 2008. **Pemanfaatan Limbah Batubara (Fly Ash) Untuk Stabilisasi Tanah Maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya Dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan**, Semarang: Universitas Diponegoro.
- Xiao, Y. et al., 2016. "Fly Ash-Based Geopolymer: Clean Production, Properties And Applications". **J. Cleaner Product**, Volume 125, pp. 253-267.
- Xu, H. & van Deventer, J., 2000. "The Geopolymerisation of Alumino-silicate Minerals". **International Journal of Minerals Processin**, pp. 247-266.
- Xu, H. & van Deventer, J. S. J., 2002. "Microstructural Characterization of Geopolymers Synthesized From Kaolinite/Stabile Mixture Using XRD, MASNMR, SEM/EDX, TEM/EDX and HREM". **Cement and Concrete Research** , Volume 32, pp. 1705-1716.
- Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Al-Bakri, M. & Hussin, K., 2016. "Structure and properties of clay-based geopolymer cement": A review. **Progress in Material Science**, pp. 595-629.
-

-
- Zerfu, K. & Ekaputri, J. J., 2016. "Review on Alkali Activated Fly Ash Based Geopolymer Concrete". **Material Science Forum**, pp. 162-169.
- Zhang, N., 2019. "Structural Characteristics And Cementitious Behaviour of Basic Oxygen Furnance Slag Mud And Electric Arc Furnance Slag". Dalam: **Construction and Building Materials** 219. s.l.:Elsevier, pp. 11-18.

LAMPIRAN

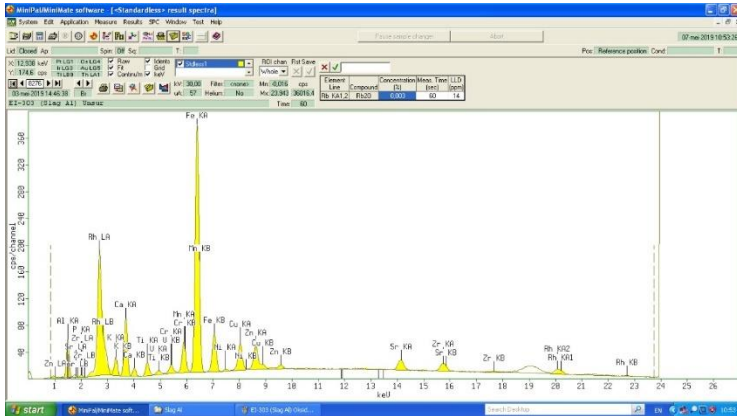
Lampiran 1 Hasil XRF

a. Abu Layang



Compound	Conc (%)
Al ₂ O ₃	16,7
SiO ₂	43,2
K ₂ O	1,17
CaO	3,9
TiO ₂	1,96
V ₂ O ₅	0,084
Cr ₂ O ₃	0,051
MnO	0,34
Fe ₂ O ₃	28,5
NiO	0,055
CuO	0,04
ZnO	0,08
MoO ₃	3,39
BaO	0,2
Re ₂ O ₇	0,3

b. *Slag*

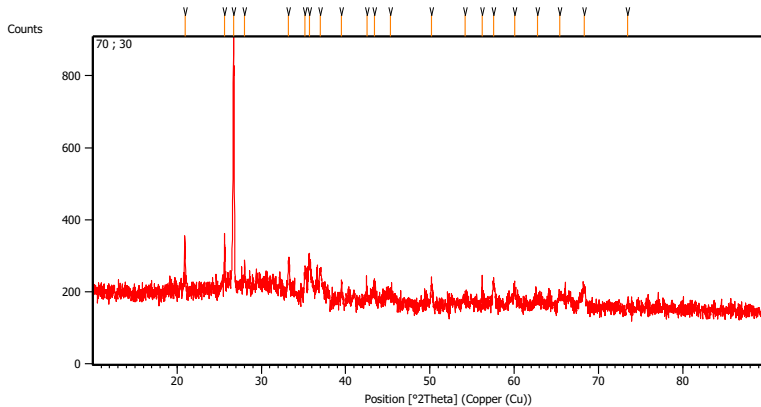


Compound	Conc (%)
Al ₂ O ₃	85,4
P ₂ O ₅	0,9
K ₂ O	1,65
CaO	4,69
TiO ₂	0,7
V ₂ O ₅	0,1
Cr ₂ O ₃	0,23
MnO	0,602
Fe ₂ O ₃	4,71
NiO	0,031
CuO	0,369
ZnO	0,298
SrO	0,18
ZrO ₂	0,17

Lampiran 2

Hasil Pengujian XRD

a. Rasio 70:30

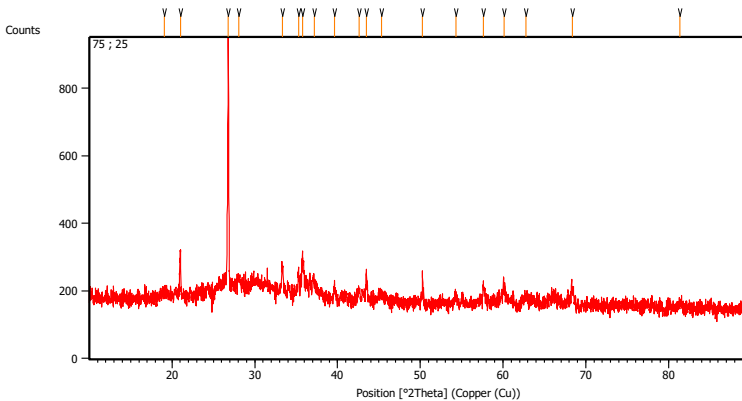


Peak List

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.9428	131.62	0.1004	4.24186	20.13
25.6515	112.52	0.1338	3.47290	17.21
26.6864	653.92	0.1338	3.34052	100.00
28.0129	43.55	0.2007	3.18528	6.66
33.2438	81.36	0.1673	2.69507	12.44
35.1743	61.48	0.2007	2.55145	9.40
35.7096	94.62	0.2007	2.51442	14.47
37.0171	72.60	0.2007	2.42856	11.10
39.5038	54.74	0.1004	2.28123	8.37
42.5183	42.74	0.2007	2.12621	6.54
43.4211	51.87	0.2676	2.08408	7.93
45.3097	23.81	0.8029	2.00150	3.64
50.2138	51.30	0.1673	1.81693	7.85
54.1828	16.70	0.4015	1.69284	2.55

56.1941	83.29	0.0612	1.63557	12.74
57.5346	66.80	0.1004	1.60194	10.22
60.0508	46.88	0.2007	1.54069	7.17
62.7748	24.53	0.5353	1.48023	3.75
65.4250	34.04	0.4015	1.42654	5.20
68.2959	52.76	0.2676	1.37341	8.07
73.4764	24.55	0.2007	1.28885	3.75

b. Rasio 75:25

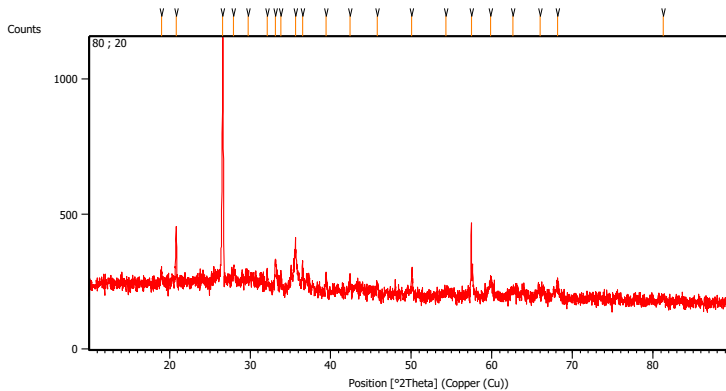


Peak List

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
19.0771	17.65	0.8029	4.65229	2.36
21.0208	143.38	0.1338	4.22630	19.17
26.7894	748.09	0.0669	3.32791	100.00
28.0803	27.21	0.3346	3.17779	3.64
33.3352	63.77	0.2007	2.68789	8.52
35.2872	71.08	0.1338	2.54355	9.50
35.7528	99.26	0.1673	2.51149	13.27

37.2239	43.77	0.5353	2.41554	5.85
39.6431	36.52	0.2676	2.27354	4.88
42.5801	34.31	0.2007	2.12327	4.59
43.4853	88.90	0.1673	2.08115	11.88
45.3168	20.73	0.8029	2.00121	2.77
50.2656	95.27	0.0612	1.81367	12.74
54.3254	20.46	0.4015	1.68873	2.74
57.6124	60.76	0.1004	1.59996	8.12
60.1246	53.49	0.2007	1.53898	7.15
62.7585	20.25	0.5353	1.48058	2.71
68.3610	50.22	0.2676	1.37226	6.71
81.3949	16.53	0.5353	1.18230	2.21

c. Rasio 80:20



Peak List

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
19.0026	47.32	0.2007	4.67036	5.18
20.8341	180.98	0.1171	4.26375	19.79

26.6091	914.39	0.1171	3.35005	100.00
27.9566	33.99	0.4015	3.19156	3.72
29.7366	19.90	0.8029	3.00445	2.18
32.1264	68.92	0.1171	2.78621	7.54
33.1469	96.13	0.1673	2.70273	10.51
33.8479	44.29	0.2007	2.64834	4.84
35.6690	142.02	0.2007	2.51719	15.53
36.5081	104.43	0.1338	2.46124	11.42
39.4118	68.66	0.1004	2.28634	7.51
42.3929	33.69	0.2007	2.13221	3.68
45.7907	32.01	0.2007	1.98159	3.50
50.0836	86.43	0.1338	1.82134	9.45
54.3427	17.31	0.9368	1.68823	1.89
57.4618	249.11	0.0612	1.60246	27.24
59.8816	64.55	0.2676	1.54464	7.06
62.6131	18.13	0.8029	1.48366	1.98
66.0043	22.79	0.8029	1.41542	2.49
68.1877	44.39	0.3346	1.37532	4.85
81.2757	16.09	0.8029	1.18373	1.76

Lampiran 3

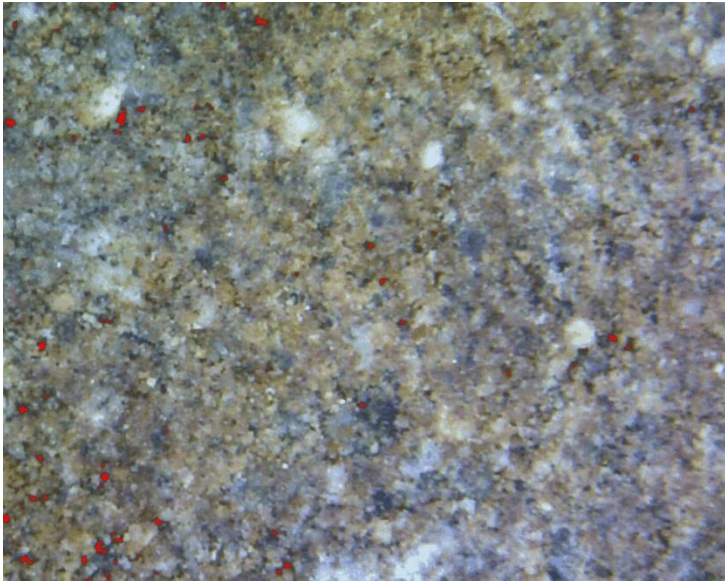
Hasil Analisis *Software ImageJ*

Berikut adalah tabel dari persen area yang dianalisis menggunakan *software imageJ*:

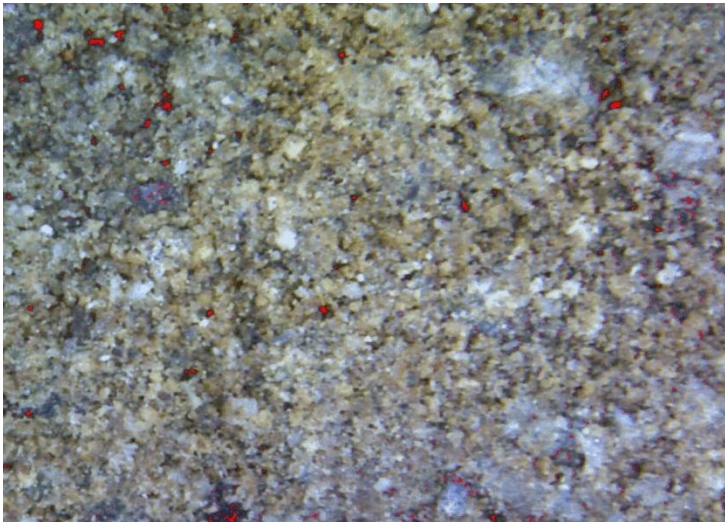
Slice	Count	Total area	Avg size	%area
70:30	144	2812	19.528	0.215
75:25	1625	8599	5.292	0.656
80:20	1694	9400	5.549	0.717

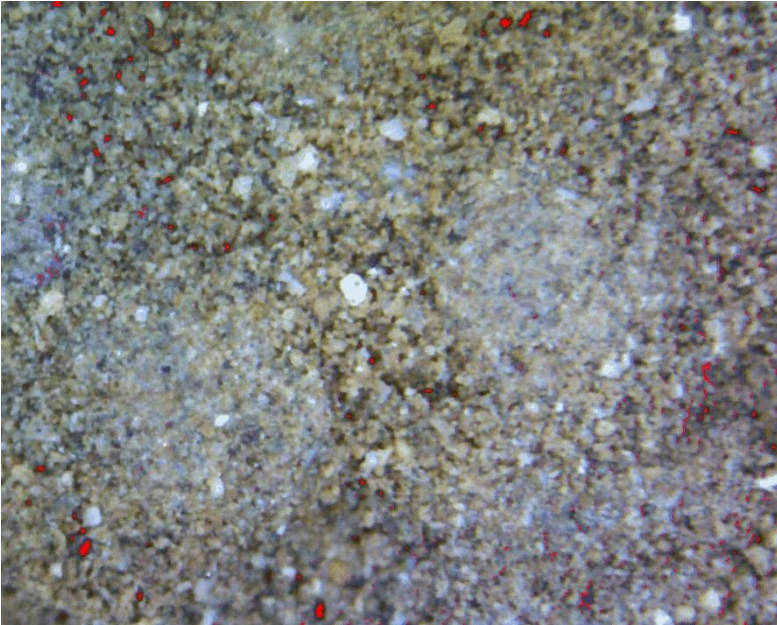
Gambar hasil analisis ditunjukkan pada gambar berikut dengan daerah berwarna merah menunjukkan daerah berpori:

A) Rasio 70:30



B) 75:25



C) 80:20*Lampiran 4***Pengujian Penyerapan Air**

Pengujian penyerapan air dilakukan dengan menghitung persen pertambahan massa yang terjadi setelah sampel geopolimer direndam di dalam air, adapun rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$A_w = \frac{(w_1 - w_0)}{w_0} \times 100\%$$

Dimana:

A_w : Absorption water

w_1 : massa setelah direndam dalam air (g)

w_0 : massa awal (g)

Data yang didapat lalu dimasukkan ke dalam tabel sebagai berikut:

Sampel	Temperatur Curing (°C)	Massa awal (g)	Massa Sampel (g) Setelah Perendaman	Adsorpsi Air (%)
70:30	30	40,08	46,14	15,12
70:30	55	41,9	49,86	19,00
75:25	30	38,63	50,69	31,22
75:25	55	38,25	51,73	35,24
80:20	30	35,07	47,25	34,73
80:20	55	35,8	48,64	35,87

Lampiran 4

Pengujian Densitas

Perhitungan nilai densitas atau massa jenis pada sampel geopolimer dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Dimana :

ρ : densitas (kg/m³)

m : massa benda uji kering di udara (g)

V : volume (cm³)

Perhitungan volume dilakukan dengan menggunakan rumus volume tabung yaitu :

$$V = \pi r^2 t$$

dengan r = 1,25

t = sesuai tabel

Kemudian data yang dihasilkan dimasukkan ke dalam tabel sebagai berikut:

Dengan spesifikasi:

- Sampel A untuk temperatur 30 °C pada umur 7 hari
- Sampel B untuk temperatur 55 °C pada umur 14 hari
- Sampel C untuk temperatur 30 °C pada umur 28 hari
- Sampel D untuk temperatur 55 °C pada umur 7 hari
- Sampel E untuk temperatur 30 °C pada umur 14 hari
- Sampel F untuk temperatur 55 °C pada umur 28 hari

a. Rasio 70:30

Sampel 70:30	Massa (g)	Panjang (cm)	Volume (cm ³)	Densitas (kg/m ³)
A	41,39	4,9	24,041	1721,66
B	39,76	4,7	23,059	1724,24
C	40,67	4,8	23,550	1726,96
D	39,98	4,7	23,059	1733,78
E	41,84	4,8	23,550	1776,64
F	42,03	4,8	23,550	1784,71

b. Rasio 75:25

Sampel 75:25	Massa (g)	Panjang (cm)	Volume (cm ³)	Densitas (kg/m ³)
A	37,49	4,8	23,550	1591,932

B	38,87	4,9	24,041	1616,846
C	37,46	4,7	23,059	1624,502
D	39,35	5	24,531	1604,076
E	38,43	4,8	23,550	1631,847
F	40,84	5	24,531	1664,815

c. Rasio 80:20

Sampel 75:25	Massa (g)	Panjang (cm)	Volume (cm ³)	Densitas (kg/m ³)
A	36,32	4,9	24,041	1510,776
B	36,55	4,8	23,550	1552,017
C	38,71	5	24,531	1553,620
D	37,46	5	24,531	1527,032
E	36,75	4,8	23,550	1560,510
F	37,35	4,9	24,041	1577,987

Lampiran 5

Pengujian Kuat Tekan

Data yang diperoleh dari pengukuran kuat tekan adalah beban tekan yang dapat ditanggung oleh geopolimer dalam satuan kilogram-force. Untuk mendapat data kuat tekan dengan satuan Mpa, data yang diperoleh diubah terlebih dahulu ke dalam satuan Newton dengan cara membagi nya dengan luas alas dari sampel dengan rumus:

$$P = \frac{F}{A}$$

Dimana:

P : kuat tekan (kgf/cm²)

F : beban tekan (kgf)

A : luas penampang (cm²)

Penampang geopolimer berbentuk lingkaran sehingga digunakan rumus luas lingkaran, dengan rumus: $A = \pi \times r^2$

$\pi = 3,14$

$d = 2,5 \text{ cm}$ maka $r^2 = (1,25)^2$

Jadi, $A = \pi \times r^2 = 3,14 \times 1,25^2 = 4,906 \text{ cm}^2$

Maka, nilai A dimasukkan ke rumus berikut:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{151,78}{4,906} = 30,93 \text{ kgf/cm}^2$$

Diketahui bahwa :

1 kilogram-force/centimeter² = 0,0980665 newton/millimeter²

Dan 1 newton/millimeter² = 1 megapascal

Maka $f^c = 0,0980665 \times 30,93 \text{ kgf/cm}^2$

$= 3,033 \text{ N/mm}^2 = 3,033 \text{ MPa}$

Dengan cara perhitungan diatas, didapatkan hasil kuat tekan dari geopolimer yang berusia 7, 14 dan 28 hari seperti tabel berikut:

Dengan spesifikasi:

- Sampel A untuk temperatur 30 °C pada umur 7 hari
- Sampel B untuk temperatur 55 °C pada umur 14 hari
- Sampel C untuk temperatur 30 °C pada umur 28 hari
- Sampel D untuk temperatur 55 °C pada umur 7 hari
- Sampel E untuk temperatur 30 °C pada umur 14 hari
- Sampel F untuk temperatur 55 °C pada umur 28 hari

a. Rasio 70:30

Sampel 70:30	Luas Alas (cm ²)	Beban Tekan (kgf)	Kuat Tekan (kgf/cm ²)	Kuat Tekan (Mpa)
A	4,906	151,780	30,936	3,034
B	4,906	165,830	33,800	3,315
C	4,906	169,000	34,446	3,378
D	4,906	160,430	32,699	3,207
E	4,906	177,000	36,076	3,538
F	4,906	193,400	39,419	3,866

b. Rasio 75:25

Sampel 75:25	Luas Alas (cm ²)	Beban Tekan (kgf)	Kuat Tekan (kgf/cm ²)	Kuat Tekan (Mpa)
A	4,906	103	20,994	2,059
B	4,906	136,85	27,893	2,735
C	4,906	143	29,146	2,858
D	4,906	124,33	25,341	2,485
E	4,906	153,75	31,338	3,073
F	4,906	159,21	32,450	3,182

c. Rasio 80:20

Sampel 80:20	Luas Alas (cm ²)	Beban Tekan (kgf)	Kuat Tekan (kgf/cm ²)	Kuat Tekan (Mpa)
A	83	103	16,917	1,659
B	90,67	136,85	18,481	1,812
C	101,73	143	20,735	1,819
D	87,73	124,33	17,881	1,754
E	97	153,75	19,771	1,939
F	91,02	159,21	18,552	2,033

UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai penutup penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas bimbingannya selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.
2. Ibu Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir atas bimbingannya selama pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir
3. Ayah, Mama, adik-adik dan keluarga besar yang selalu mendukung serta memberikan doa selama penelitian Tugas Akhir dan penyusunan laporan.
4. Teman-teman yang selalu mendukung serta memberikan doa selama penelitian Tugas Akhir dan penyusunan laporan.
5. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dukungan dan membantu kelancaran proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Lhokseumawe pada tanggal 12 Juli 1997 dari bapak bernama Anwar M. Yacob dan ibu bernama Nyanyak Meutia. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Hobi penulis di antaranya olahraga, bermain game, dan menonton film. Penulis menyelesaikan pendidikannya di TK 2 YAPENA pada tahun 2001-2003, SD 2 YAPENA pada tahun 2003-2009, MTsS YAPENA pada tahun 2009-2012, SMAN 10 FAJAR HARAPAN Banda Aceh pada tahun 2012-2015 dan perguruan tinggi di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) tahun 2015-2020. Semasa kuliah penulis aktif di organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) FTI-ITS, sebuah organisasi yang berfokus pada pengembangan nilai sosial masyarakat di lingkup fakultas. Kecintannya pada olahraga membuat penulis aktif di berbagai klub bidang olahraga di Himpunan Mahasiswa Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS. Pengalaman kerja praktek yang pernah dilakukan penulis yaitu di PT. Dirgantara Indonesia mengenai *solution heat treatment* terhadap komponen pada pesawat. Saat ini penulis tinggal di Jalan Tgk Seumatang No.37 Padang Sakti, Lhokseumawe, Aceh. Penulis dapat dihubungi melalui *email* dan nomor telepon: mochmaul9@gmail.com dan 082292378407