



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

SKRIPSI

**OPTIMALISASI KOMPOSISI GEOPOLIMER
BERBASIS ABU LAYANG PT. IPMOMI DENGAN
VARIASI KONSENTRASI NaOH DAN RASIO S/L**

**BAGUS AKBAR AFFEBRIANSYAH
NRP. 012 115 40 000 065**

**Dosen Pembimbing :
Hamzah Fansuri, M.Si, Ph.D
Ir. Endang Purwanti S., M.T**

**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS SAINS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

SCRIPT

**COMPOSITION OPTIMALIZATION OF
GEOPOLIMER BASED FLY ASH PT. IP. IPMOMI
WITH NaOH CONCENTRATION VARATIONS AND
SOLID/LIQUID RATIO**

**BAGUS AKBAR AFFEBRIANSYAH
NRP. 012 115 40 000 065**

**Supervisor :
Hamzah Fansuri, M.Si, Ph.D
Ir. Endang Purwanti S., M.T**

**DEPARTEMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

**OPTIMALISASI KOMPOSISI GEOPOLIMER BERBASIS
ABU LAYANG PT. IPMOMI DENGAN VARIASI
KONSENTRASI NaOH DAN RASIO S/L**

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Salah satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Sains
pada
Program Studi S-1 Departemen Kimia
Fakultas Sains
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
BAGUS AKBAR AFFEBRIANSYAH
NRP. 012 115 40 000 065

**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS SAINS
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

LEMBAR PENGESAHAN

**OPTIMALISASI KOMPOSISI GEOPOLIMER BERBASIS
ABU LAYANG PT. IPMOMI DENGAN VARIASI
KONSENTRASI NaOH DAN RASIO S/L**

SKRIPSI

Disusun oleh :

BAGUS AKBAR AFFEBRIANSYAH

NRP. 012 115 40 000 065

Surabaya, 29 Mei 2019

Menyetujui,

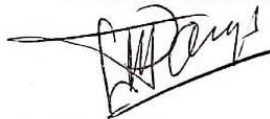
Dosen Pembimbing I



Hamzah Fansuri, M.Si, Ph.D

NIP. 19691017 199412 1 001

Dosen Pembimbing II



Ir. Endang Purwanti S., M.T

NIP. 195601101985032001



Mengetahui,
Kepala Departemen Kimia,

Prof. Dr. Didik Prasetyoko, M.Sc

NIP 19710616 199703 1 002

Karya ini kusembahkan untuk
Ibu, Ayah dan Kakaku tersayang
Dosen pembimbing, Bapak Hamzah dan Ibu Endang
Keluargaku yang dikampus, Goldschmidt
Teman seperjuangan dan senasib, C-33
Serta sebagai wujud syukurku kepada Allah SWT
dan salamku pada Baginda Agung Rasulullah Muhammad SAW

OPTIMALISASI KOMPOSISI GEOPOLIMER BERBASIS ABU LAYANG PT. IPMOMI DENGAN VARIASI KONSENTRASI NaOH DAN RASIO S/L

Nama Mahasiswa : Bagus Akbar Affebriansyah
NRP : 01211540000065
Departemen : Kimia ITS
Dosen Pembimbing : Hamzah Fansuri, M.Si, Ph.D
Ir. Endang Purwanti S., M.T

ABSTRAK

Geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI berhasil disintesis dengan variasi konsentrasi NaOH 10 M, 11 M, 12 M, 13 M, dan 14 M. Geopolimer yang telah berumur 7 hari dan 28 hari dilakukan pengujian kuat tekan, XRD, SEM dan pH untuk mengetahui pengaruh penambahan konsentrasi NaOH yang berbeda. Hasil uji kuat tekan mengalami peningkatan dari usia 7 hingga 28 hari. Hasil analisis XRD mengindikasikan adanya penurunan fasa kristalin atau semakin banyaknya fasa amorf dengan semakin besarnya konsentrasi NaOH yang ditambahkan. Pembacaan SEM yang dilakukan pada geopolimer menunjukkan masih adanya partikel abu layang yang belum bereaksi. Penambahan konsentrasi NaOH 12 M memberikan kuat tekan terbaik sebesar 48,4 Mpa dibandingkan dengan variasi yang lain. Oleh karena itu, geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH tersebut kemudian dilakukan variasi rasio S/L 3,1; 3,6; 4,1; dan 4,6 yang selanjutnya juga dilakukan uji *setting time* dan kuat tekan. Geopolimer dengan rasio 3,6 memberikan hasil kuat tekan terbaik dengan nilai sebesar 44,59 Mpa.

Kata kunci : geopolimer, larutan pengaktif basa, rasio S/L

COMPOSITION OPTIMALIZATION OF GEOPOLIMER BASED FLY ASH PT. IP. IPMOMI WITH NaOH CONCENTRATION VARIATIONS AND SOLID/LIQUID RATIO

Nama Mahasiswa : Bagus Akbar Affebriansyah
NRP : 01211540000065
Departemen : Kimia ITS
Dosen Pembimbing : Hamzah Fansuri, M.Si, Ph.D
Ir. Endang Purwanti S., M.T

ABSTRACT

Geopolymers based on fly ash PT. IPMOMI was successfully synthesized by varying the concentration of 10 M, 11 M, 12 M, 13 M and 14 M NaOH. Geopolymers aged 7 days and 28 days were tested for compressive strength, XRD, SEM and pH to determine the effect of adding different concentrations NaOH. The compressive strength test results have increased from ages 7 to 28 days. The results of the XRD analysis indicated a decrease in the crystalline phase or the increasing number of amorphous phases with the greater concentration of NaOH added. SEM readings carried out on geopolymers show that there are still fly ash particles that have not reacted. The addition of NaOH 12 M concentration gave the best compressive strength of 48.4 Mpa compared to other variations. Therefore, geopolymers with variations in NaOH concentration were then carried out by variations of the S / L ratio of 3.1; 3,6; 4.1; and 4.6 which then also tested the setting time and compressive strength. Geopolymer with a ratio of 3.6 gives the best compressive strength with a value of 44.59 MPa.

Key Words : Geopolymer, alkali activator, S/L rasio

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamin. Puji syukur kehadiran Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya serta syafa'at Baginda Agung Rasulullah Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan dengan baik naskah Skripsi yang berjudul **“OPTIMALISASI KOMPOSISI GEOPOLIMER BERBASIS ABU LAYANG PT. IPMOMI DENGAN VARIASI KONSENTRASI NaOH DAN RASIO S/L”**. Tulisan ini tidak akan terwujud tanpa bantuan, dukungan, doa dan serta dorongan semangat dari semua pihak. Untuk itu penulis sangat berterima kasih kepada:

1. Hamzah Fansuri M.Si., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang selama ini telah memberikan bimbingan dan pengarahan baik selama proses penyelesaian naskah ini.
2. Ir. Endang Purwanti S., M.T., selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan dan saran yang baik selama proses penyelesaian naskah ini.
3. Prof. Dr. R. Y. Perry Burhan, M.Sc, selaku dosen wali akademik atas nasihat, motivasi dan motivasi yang diberikan selama proses penyelesaian naskah skripsi ini.
4. Prof. Dr. Didik Prasetyoko, M.Sc, selaku Ketua Jurusan Kimia atas fasilitas yang telah diberikan hingga naskah skripsi ini dapat terselesaikan.
5. Dr. Djoko Hartanto, M.Si. selaku kepala laboratorium yang telah memberikan fasilitas sehingga naskah skripsi ini bisa terselesaikan.
6. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberi dukungan, doa serta semangat yang tiada henti
7. Sintya Dwi Pamukti yang selalu memberikan semangat, dorongan dan motivasi yang tiada henti

8. Teman-teman GOLDSCHMIDT, HIMKA ITS dan teman-teman penelitian di Laboratorium Kimia Material dan Energi
9. Teman-teman penelitian geopolimer yang telah memberikan bantuan, semangat dan motivasi dalam proses pengerjaan naskah skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan naskah Skripsi ini tidak lepas dari kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk dapat meningkatkan kualitas dan perbaikan lebih lanjut. Semoga Skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, 29 Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	iv
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II.....	5
Tinjauan Pustaka.....	5
2.1 Geopolimer.....	5
2.1.3 Reaksi Geopolimerisasi.....	7
2.3 Abu layang.....	12
2.3.1 Abu Layang PT. IPMOMI.....	13
2.4 Pengaruh Rasio S/L dalam Geopolimer.....	14
2.5 Pengukuran pH Geopolimer.....	15
2.6 Kuat Tekan.....	15
2.7 XRD (X-Ray Diffraction).....	16
2.8 SEM (Scanning Electron Microscopy).....	17
BAB III.....	19
METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1. Alat dan Bahan.....	19
3.1.1. Alat.....	19
3.1.2. Bahan.....	19
3.2. Prosedur Kerja.....	19
3.2.1. Preparasi Abu Layang.....	19
3.2.2. Pembuatan Pengaktif basa.....	20
3.2.3. Persiapan Larutan Variasi S/L.....	20

3.2.4. Persiapan Cetakan Geopolimer	21
3.2.5. Sintesis Geopolimer.....	21
3.2.6. Standarisasi HCl	22
3.2.7. Pengujian pH Geopolimer	23
3.3. Karakterisasi	24
3.3.1. Waktu Setting (Setting time)	24
3.3.2. Uji Kuat Tekan	24
3.3.3. Analisa X-Ray Diffraction (XRD).....	25
3.3.4. Analisa Morfologi Geopolimer dengan SEM	25
BAB IV	27
HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Sintesis Geopolimer	27
4.1.1 Penentuan Konsentrasi Optimum NaOH dalam Larutan Pengaktif basa.....	27
4.1.2 Penentuan Rasio Solid/Liquid	29
4.2 Kuat Tekan Geopolimer	32
4.2.1 Hasil Kuat Tekan Geopolimer dengan Variasi Komposisi NaOH	32
4.2.2 Hubungan Kuat Tekan dengan Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	34
4.2.3 Kuat Tekan Geopolimer dengan Variasi Rasio S/L	36
4.3 Analisa Fasa Geopolimer menggunakan XRD	38
4.4 Analisa Morfologi Geopolimer	40
4.5 Analisa pH Geopolimer.....	42
BAB V	45
KESIMPULAN	45
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN.....	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Skema diagram pembentukan geopolimer	5
Gambar 2. 2	Macam struktur dasar berdasarkan rasio Si/Al	6
Gambar 2. 3	Model proses pembentukan Geopolimer dari Abu layang dalam larutan Pengaktif basa	9
Gambar 2. 4	Mekanisme penyusunan jaringan geopolimer.....	9
Gambar 2. 5	Struktur ikatan Si-O-Si dan SI-O-Al pada geopolimer	10
Gambar 2. 6	struktur 3 dimensi geopolimer	11
Gambar 2. 7	Pantulan sinar x oleh bidang atom S_1S_1 dan S_2S_2 yang terpisah dengan jarak d	17
Gambar 4. 1	Grafik hubungan rasio S/L dengan waktu setting ..	31
Gambar 4. 2	Grafik kuat tekan geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH	33
Gambar 4. 3	Grafik hubungan rasio $Na_2SiO_3/NaOH$ dengan kuat tekan geopolimer	36
Gambar 4. 4	Difraktogram sinar-X sampel: (A) Abu layang PT. IPMOMI, (B) Geo-A, (C) Geo-B, (D) Geo-C, (E) Geo-D dan (F) Geo-E	39
Gambar 4. 5	Mikrograf SEM geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH	41

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Komposisi kimia abu layang PT. IPMOMI	13
Tabel 3. 1.	Komposisi massa NaOH yang digunakan	20
Tabel 3. 2	Komposisi massa aqua DM yang ditambahkan	21
Tabel 3. 3	Komposisi pembuatan geopolimer	22
Tabel 4. 1	Kadar Na ₂ O, SiO ₂ dan H ₂ O pada waterglass	28
Tabel 4. 2	Komposisi resep geopolimer	28
Tabel 4. 3	Rasio mol dalam geopolimer.....	28
Tabel 4. 4	Hubungan rasio S/L dengan viskositas	30
Tabel 4. 5	Hubungan rasio S/L dengan waktu pengeringan geopolimer	30
Tabel 4. 6	Hubungan kuat tekan Geopolimer variasi konsentrasi NaOH.....	33
Tabel 4. 7	Hubungan kuat tekan variasi rasio Na ₂ SiO ₃ /NaOH..	35
Tabel 4. 8	Hubungan kuat tekan geopolimer dengan variasi rasio S/L	37
Tabel 4. 9	Data kristalinitas relatif geopolimer	40
Tabel 4. 10	pH geopolimer yang dihasilkan.....	42

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Geopolimer adalah polimer anorganik hasil reaksi antara sumber aluminosilikat yang diaktivasi oleh pengaktif basa. Geopolimer dianggap sebagai alternatif pengikat seperti semen portland yang ramah lingkungan. Hal tersebut bukan hanya terkait dengan manfaat lingkungan yang ditimbulkan dari pengurangan emisi gas CO₂ yang dihasilkan pada produksi semen portland, tetapi juga dalam hal kinerja dan daya tahannya. Geopolimer memiliki sifat yang setara dengan semen portland, bahkan seringkali memiliki sifat yang lebih baik dari semen portland (Duxson dkk., 2007). Geopolimer dapat dibuat dari semua jenis sumber aluminosilikat yang dapat larut dalam pengaktif basa seperti NaOH dan KOH yang akan bertindak sebagai prekursor geopolimer (Komnitsas, 2011). Namun, para peneliti memilih menggunakan limbah industri seperti *slag* dan abu layang sebagai sumber aluminosilikat karena dinilai lebih ekonomis dan memiliki kandungan alumina dan silika yang tinggi.

Abu layang adalah hasil pembakaran batu bara yang berukuran sangat halus dan sangat ringan sehingga dapat melayang di udara. 90 % hasil pembakaran batubara diubah menjadi abu layang (Wu, dkk., 2005). Konsumsi batubara dalam negeri mencapai 96 juta ton pada tahun 2015 (Nugraha, 2017). Jika 8% dari residu pembakaran diubah menjadi abu layang, maka abu layang yang dihasilkan sebagai residu dapat mencapai 7,68 juta ton. Selain itu, produksi abu layang diperkirakan akan meningkat dengan meningkatnya permintaan batubara sebesar 6,3 % tiap tahunnya sebagai bahan bakar pengganti minyak bumi. Di sisi lain, sejauh ini abu layang yang dihasilkan PLTU digunakan oleh pabrik semen hanya sebagai campuran pembuatan semen portland, sehingga banyak sisa abu layang yang tidak terserap oleh pabrik semen dan menumpuk sebagai limbah. Berdasarkan peraturan pemerintah No. 101 tahun 2014 menyebutkan bahwa abu layang merupakan limbah B3, sehingga membutuhkan pengolahan tertentu sebelum dibuang

bebas ke lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan abu layang sebagai bahan baku geopolimer sangat tepat untuk dilakukan.

Abu layang merupakan material yang kaya akan silika dan alumina. Namun, perbedaan metode pembakaran batu bara dan perbedaan cara pengumpulan abu layang menghasilkan abu layang yang berbeda sifat dan kandungannya (Brindle dan McCarthy, 2006; Kumar, dkk., 2015). Hal ini menimbulkan dibutuhkan metode standar untuk membuat geopolimer. Fansuri dkk. (2010) menjelaskan bahwa sifat abu layang dari batu bara sangat bergantung pada bahan batu bara yang digunakan dan proses pembakarannya. Sifat-sifat fisika kimia tersebut mempengaruhi proses geopolimerisasi abu layang sehingga geopolimerisasi abu layang selama ini bersifat unik dan belum ada pedoman yang bersifat generik untuk menentukan parameter proses yang paling sesuai bagi abu layang tersebut.

Selain komposisi kimia abu layang yang berbeda-beda, rasio S/L dan konsentrasi larutan Pengaktif basa memiliki pengaruh yang dominan pada struktur dan kekuatan geopolimer. Rasio S/L berhubungan dengan viskositas geopolimer yang dihasilkan. Viskositas yang rendah akan menyebabkan pasta geopolimer memiliki porositas yang tinggi yang mengurangi kuat tekan. Geopolimer dengan rasio S/L yang tinggi akan menyebabkan viskositas pasta geopolimer menjadi tinggi sehingga laju alirnya semakin sulit, dan menghasilkan geopolimer dengan porositas yang rendah, namun memiliki waktu setting (*setting time*) yang cepat dan adesi yang lebih baik (Cheng dkk., 2015). Sedangkan konsentrasi larutan pengaktif basa berhubungan dengan proses pelarutan sumber aluminosilikat. Semakin besar konsentrasi larutan pengaktif basa maka semakin banyak sumber aluminosilikat yang dapat larut. Pelarutan sumber aluminosilikat yang semakin banyak akan menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan geopolimer yang semakin besar (Hamidi dkk., 2016).

Sebagaimana dengan uraian tersebut yang menunjukkan bahwa geopolimer dipengaruhi oleh sumber aluminosilikat, sifat dan konsentrasi larutan pengaktif basa, maka pada penelitian ini

dilakukan sintesis geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI dengan variasi konsentrasi larutan pengaktif basa dan variasi rasio S/L untuk menghasilkan geopolimer dengan sifat yang optimum.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah berapa konsentrasi larutan pengaktif basa dan rasio solid/liquid yang optimal untuk mendapatkan geopolimer berbahan dasar abu layang PT. IPMOMI dengan kekuatan tekan yang tinggi dan bagaimana komposisi fasa, morfologi dan kebasaaan geopolimer yang dihasilkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan rasio S/L dan konsentrasi larutan pengaktif basa yang optimal agar dihasilkan geopolimer dengan kekuatan tekan maksimal dengan menggunakan bahan dasar abu layang PT. IPMOMI di Probolinggo Jawa Timur

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan mampu memberikan informasi tentang pengaruh konsentrasi larutan pengaktif basa dan rasio S/L yang optimum pada pembuatan geopolimer berbasis abu layang. Informasi yang dihasilkan diharapkan dapat digunakan untuk membuat geopolimer dengan kekuatan tekan optimum.

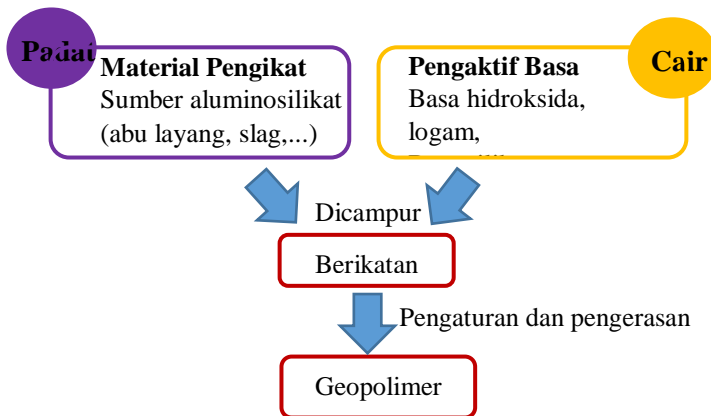
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

Tinjauan Pustaka

2.1 Geopolimer

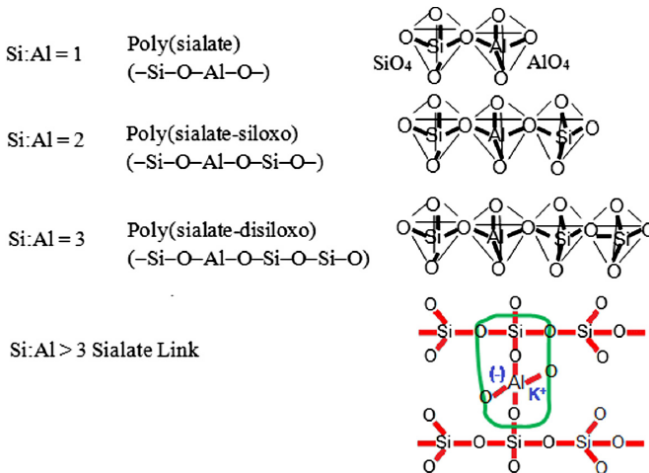
Berkembangnya penelitian tentang material bangunan yang ramah lingkungan membuat penelitian tentang beton geopolimer menjadi topik penelitian yang populer. Davidovits (1994) mendefinisikan geopolimer sebagai perekat tanpa semen yang sangat mirip dengan zeolit dan disintesis sebagai hasil dari beberapa reaksi yang berbeda antara larutan basa dan bahan baku aluminosilikat. Geopolimer disintesis melalui proses polimerisasi bahan-bahan anorganik. Limbah industri yang banyak mengandung alumina (Al) dan Silika (Si) berfase padat merupakan bahan yang sering digunakan dalam sintesis geopolimer (Manuahe dkk., 2014). Secara umum reaksi pembentukan geopolimer terjadi sesuai Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Skema diagram pembentukan geopolimer (Yun-Ming dkk., 2016)

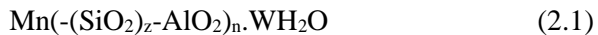
Geopolimer memiliki komposisi kimia yang mirip dengan zeolit namun memiliki struktur amorf atau semi kristal dengan jaringan polimerik 3 dimensi Si-O-Al (Yun-Ming dkk., 2016).

Jaringan geopolimer tersusun oleh jaringan tiga dimensi SiO_4 dan AlO_4 yang berbentuk tetrahedral dan dihubungkan oleh oksigen dari kedua senyawa (Davidovits, 1991). Penggunaan oksigen sebagai penghubung akan membuat muatan Al memiliki bilangan koordinasi empat sehingga akan bermuatan negatif. Muatan negatif ini diseimbangkan oleh kation seperti Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^+ , Ba^+ , NH_4^+ , dan H_3O^+ . Peran kation sangat penting untuk menjaga netralitas struktur dari geopolimer (Khale dan Chaudhary, 2007).



Gambar 2.2 Macam struktur dasar berdasarkan rasio Si/Al (Davidovits, 2002)

Geopolimer secara umum memiliki rumus empiris sebagai berikut:



dimana “M” adalah kation monovalent, “n” adalah derajat polikondensasi, “z” adalah banyaknya Si dalam satu rantai dan “w” adalah banyaknya H_2O yang terikat (Yun-Ming dkk., 2016). Ditinjau dari rasio Si/Al, geopolimer dapat dibedakan menjadi 3 bentuk

dasar, yaitu *poly(sialate)*, *poly(sialate-siloxo)*, dan *poly(sialate-disiloxo)* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.

2.1.2 Sumber Aluminosilikat

Aluminosilikat merupakan komponen penting dalam proses pembuatan geopolimer karena memiliki kandungan alumina (Al_2O_3) dan silika (SiO_2) yang kaya. Tingginya kandungan alumina dan silika dibutuhkan pada proses geopolimerisasi yang nantinya diubah menjadi bentuk intermediet berupa $\text{Si}(\text{OH})_4$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Sumber aluminosilikat sendiri terdiri dari alumina dan silika yang dapat ditemui di kerak bumi. Senyawa Al_2O_3 dan SiO_2 dalam sumber aluminosilikat berada pada fasa amorf sehingga bersifat lebih reaktif ketika proses geopolimerisasi berlangsung (Cioffi dkk., 2003).

Pada awal perkembangan geopolimer, kaolin merupakan bahan baku yang digunakan pada proses pembuatannya. Seiring dengan banyaknya penelitian tentang geopolimer, saat ini sumber aluminosilikat yang digunakan meliputi abu layang, slag, abu sekam padi, abu kayu yang mengandung kalsium yang tinggi dan sumber aluminosilikat lainnya baik yang alami maupun yang buatan seperti zeolit, bubuk murni $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (Duxson dkk., 2007). Oleh karena itu, efisiensi dalam pembuatan geopolimer sangat bergantung pada aktivator dan jenis sumber aluminosilikat yang digunakan (Provis dan van Deventer, 2009).

2.1.3 Reaksi Geopolimerisasi

Reaksi geopolimerisasi merupakan reaksi pembentukan jaringan geopolimer. Provis dan Van Deventer (2009) mendefinisikan reaksi geopolimer berupa reaksi kimia yang terdiri atas pelarutan secara total maupun sebagian sumber aluminosilikat menjadi spesi-spesi Al dan Si yang kemudian membentuk jaringan polimetrik 3 dimensi. Sedangkan menurut Buchwald dkk. (2011) mengelompokkan reaksi geopolimerisasi menjadi 2 tahap. Reaksi pertama adalah pelarutan silikat dan aluminat dari sumber aluminosilikat seperti abu layang, slag dan clay. Reaksi kedua adalah kondensasi aluminosilikat. Reaksi geopolimerisasi termasuk

reaksi polimerisasi anorganik mirip seperti pada zeolit, yang membedakan hanya terdapat fase amorf.

Reaksi geopolimerisasi dimulai ketika komponen-komponen silika dan alumina di permukaan partikel abu layang dilarutkan ke dalam larutan Pengaktif basa 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 pengaktif basa 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. Secara sederhana skema reaksi geopolimerisasi dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Gambar 2.3 menjelaskan serangan kimia larutan pengaktif basa membuat permukaan partikel abu layang menjadi berlubang yang kemudian terjadi pembentukan geopolimer di permukaan luar abu layang. Secara ringkas proses geopolimerisasi terdiri dari 3 tahap menurut Duxson dkk. (2007) dan sautsos dkk. (2016).

1. Pelarutan aluminosilikat:

Aluminosilikat padat yang ada pada bahan baku geopolimer dilarutkan dalam larutan aktivator basa pada pH tinggi sehingga terbentuk larutan silikat, aluminat dan aluminosilikat.

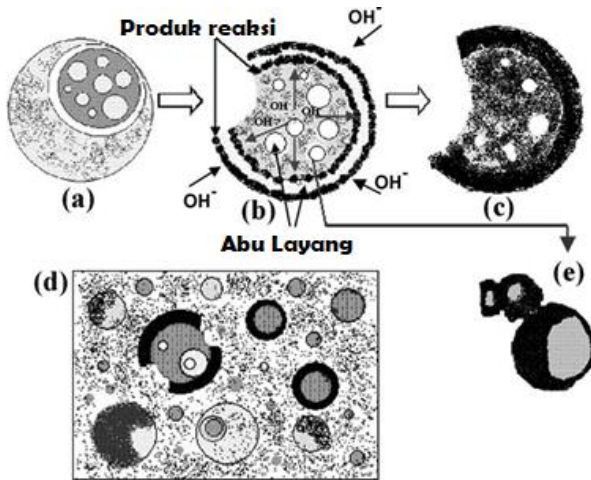
2. Pembentukan gel:

Spesies larutan yang dihasilkan pada proses pelarutan akan bereaksi dengan silikat aluminat secara berkelanjutan

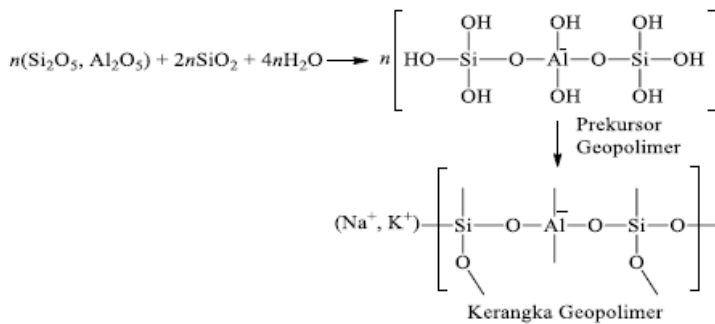
menjadi jenuh. Larutan jenuh aluminosilikat ini membentuk gel oligomer rantai panjang dan jaringan.

3. Polikondensasi:

Spesies gel terus mengatur diri dan membentuk jaringan semakin besar menghasilkan jaringan aluminosilikat tiga dimensi.

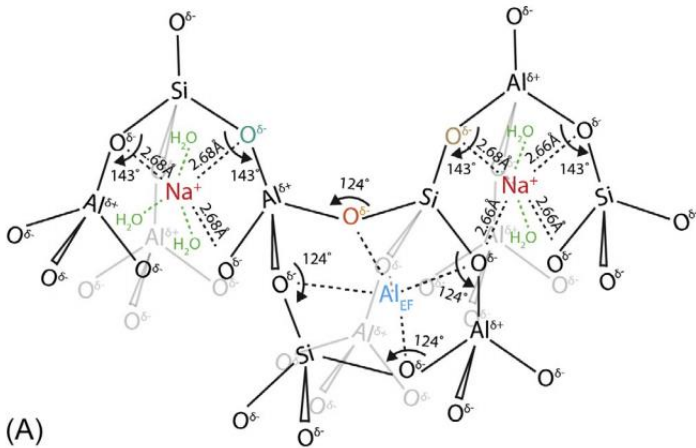


Gambar 2.3 Model proses pembentukan Geopolimer dari Abu layang dalam larutan Pengaktif basa (Fernandez-Jimenez dkk., 2005).

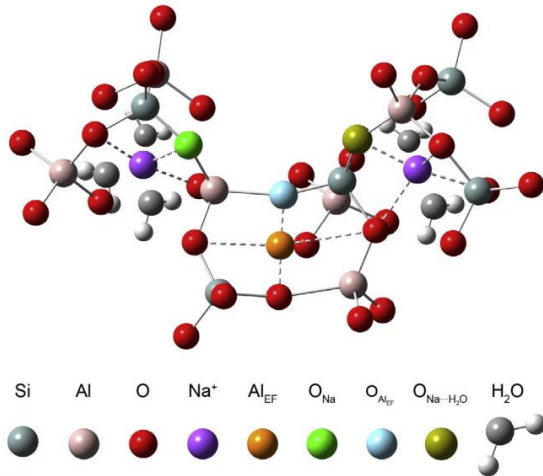


Gambar 2.4 Mekanisme penyusunan jaringan geopolimer

Ion hidroksi dari larutan pengaktif basa akan menyerang ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al, membentuk kompleks intermediet $\text{Si}(\text{OH})_4$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Muatan negatif dari proses ini kemudian distabilkan oleh logam Na^+ atau K^+ dari Pengaktif basa menjadi Si-O-Na^+ dan Al-O-Na^+ untuk mencegah reaksi balik menjadi Si-O-Si dan Si-O-Al awal (Provis dan Bernal, 2014). Skema ikat silang dapat dilihat pada Gambar 2.5 dibawah. $\text{Si}(\text{OH})_4$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ kemudian mengalami polikondensasi membentuk jaringan 3D. Reaksi polikondensasi ini mengarahkan pada presipitasi fasa solid dan kristalisasi dari jaringan 3 dimensi. Air yang digunakan sebagian terlepas melalui proses kondensasi dan sebagian lainnya terperangkap dalam jaringan 3 dimensi gel aluminosilikat. Jaringan 3 dimensi tersebut secara kontinyu akan terus terpolimerisasi dan semakin lama akan menghasilkan jaringan 3 dimensi yang terhubung kuat (Bakharev, 2005).



Gambar 2.5 Struktur ikatan Si-O-Si dan SI-O-Al pada geopolimer (Nicolas dkk., 2017).



Gambar 2. 6 Struktur 3 dimensi geopolimer (Nicolas dkk., 2017)

2.1.4 Pengaktif basa

Larutan pengaktif basa dibutuhkan dalam reaksi polimerisasi untuk mengaktifkan prekursor (sumber alumina silikat) sehingga membebaskan aluminat (AlO_4^-) dan silikat (SiO_4). Umumnya, larutan Pengaktif basa yang digunakan dalam sintesis geopolimer adalah alkali silikat (Na_2SiO_3 atau K_2SiO_3) atau alkali hidroksida (NaOH atau KOH) (Yun-Ming dkk., 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 setiap molekul tetrahedron [AlO_4].

Konsentrasi larutan pengaktif basa yang digunakan sangat berpengaruh pada kekuatan mekanik geopolimer. Hal itu disebabkan karena, sifat dan konsentrasi dari larutan pengaktif basa berpengaruh pada struktur geopolimer (Komljenovic, 2015). Semakin besar konsentrasi larutan pengaktif basa maka semakin besar sumber aluminosilikat yang dapat larut. Pelarutan sumber aluminosilikat yang semakin banyak berhubungan dengan kuat tekan geopolimer yang semakin besar (Xu dan van Deventer, 2000). Ukuran ion Na^+

dan ion K^+ yang biasanya digunakan berpengaruh pada proses pelarutan sumber aluminosilikat. Pelarutan aluminosilikat lebih mampu terjadi secara sempurna dalam ion Na^+ dibandingkan ion K^+ . Hal tersebut disebabkan karena memiliki ukuran Na^+ yang lebih kecil sehingga mampu berikatan dengan ion silikat dan ion aluminat yang selanjutnya akan membentuk monomer dan dimer yang stabil dalam larutan geopolimer (Rahier, 2007). Alasan lainnya penggunaan NaOH sebagai pengaktif basa adalah karena lebih ekonomis dibandingkan dengan KOH (Yun-Ming dkk., 2016).

2.3 Abu layang

Abu layang merupakan hasil pembakaran dari batu bara yang berukuran sangat halus dan sangat ringan sehingga dapat melayang di udara (Fansuri dkk., 2008). Keberadaan abu layang ini termasuk dalam salah satu limbah B3 (Bahan Beracun dan Berbahaya). Namun, dewasa ini pemanfaatan abu layang meningkat seiring diketahuinya komposisi dari abu layang yang kaya akan silika dan alumina. Karakteristik kimia dan fisika dari abu layang 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 dkk., 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 dkk., 2016). Berdasarkan kandungan kalsium oksidanya, abu layang diklasifikasikan menjadi 2 kelas yaitu kelas C dan kelas F. abu layang kelas C memiliki kandungan total SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 antara 50 – 70 %, serta kandungan CaO sebesar 20 %. Sedangkan abu layang kelas F memiliki kandungan kalsium rendah dan memiliki kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 lebih dari 70% (Bankowski dkk., 2004; Antiohos dan Tsimas, 2007). Oleh karena itu abu layang kelas F yang digunakan sebagai bahan baku geopolimer berbasis abu layang.

Belum adanya *mix design* yang pasti pada pembuatan geopolimer seperti yang dijelaskan sebelumnya menyebabkan pengaplikasian abu layang sebagai bahan baku geopolimer dalam skala besar menjadi sulit dilakukan. Ukuran partikel dari abu layang merupakan salah satu faktor fisik yang berpengaruh pada reaksi geopolimer (van Jaarsveld dkk., 2003). Semakin kecil ukuran partikel abu layang maka reaktivitasnya juga semakin meningkat. Sehingga dibutuhkan abu layang yang memiliki kandungan SiO_4 dan AlO_4 yang tinggi dan memiliki ukuran partikel yang kecil untuk menghasilkan karakteristik geopolimer yang lebih baik.

2.3.1 Abu Layang PT. IPMOMI

Penelitian ini menggunakan abu layang PT. IPMOMI sebagai sumber aluminosilikat. Abu layang PT. IPMOMI digunakan karena mengandung SiO_2 , Al_2O_3 dan CaO berturut-turut sebesar 50,67%, 13,76% dan 12,70%. Berdasarkan hal tersebut maka abu layang PT. IPMOMI diklasifikasikan dalam abu layang kelas F. pa

Tabel 2. 1 Komposisi kimia abu layang PT. IPMOMI (Supriadi, 2017)

No	Senyawa	Kandungan (%)
1	SiO_2	50,67
2	Al_2O_3	13,76
3	CaO	12,70
4	MgO	6,26
5	Na_2O	0,19
6	K_2O	1,28
7	TiO_2	0,76
8	Fe_2O_3	11,99
9	MnO_2	0,14
10	S_2O	0,63
11	Se_2O_3	0,12
12	P_2O_5	0,08
13	Ignition loss	1,42
	$(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$	76,42

Berdasarkan Tabel 2.1, Kandungan SiO_2 pada abu layang PT. IPMOMI mencapai 50,67%. Kandungan ini cukup tinggi sehingga kondisi menguntungkan untuk pembuatan geopolimer karena semakin banyak kandungan silika maka semakin banyak pula fasa kontinu geopolimer sehingga geopolimer menjadi lebih kuat. Kandungan Fe_2O_3 juga cukup penting diketahui dalam abu layang sebagai sumber aluminosilikat. Kandungan Fe_2O_3 pada abu layang PT. IPMOMI sebesar 11,99% cukup rendah dibandingkan dengan abu layang lainnya. Kandungan Fe_2O_3 yang rendah menguntungkan pada saat sintesis geopolimer karena besi oksida sulit larut dalam kondisi basa.

2.4 Pengaruh Rasio S/L dalam Geopolimer

Rasio padatan/cairan (S/L) didefinisikan sebagai perbandingan jumlah total massa padatan dibanding dengan jumlah total massa air (Soutsos dkk., 2016). Rasio S/L ini berkaitan dengan kemampuan laju alir geopolimer yang dihasilkan. Geopolimer yang memiliki rasio S/L yang tinggi akan memiliki viskositas yang tinggi sehingga sulit ketika akan dicetak dalam cetakan. Namun, akan mempercepat proses pengeringan geopolimer. Sebaliknya, geopolimer yang memiliki rasio S/L yang rendah akan memiliki viskositas yang rendah sehingga mempermudah dalam mencetak tetapi akan membutuhkan waktu pengeringan yang lebih lama.

Hasil penelitian Hadi dkk (2018) menunjukkan bahwa setiap abu layang memiliki nilai optimum yang khas untuk mencapai kekuatan tekan yang maksimal. Hal ini dikaitkan dengan distribusi partikel abu layang yang berbeda di setiap abu layang. Abu layang dengan partikel yang lebih halus akan membutuhkan nilai rasio S/L yang lebih besar. Abu layang dengan persentase partikel halus yang tinggi akan mengurangi gesekan-gesekan yang disebabkan dalam pencampuran geopolimer. Pengurangan tersebut menyebabkan pengurangan jumlah cairan yang dibutuhkan dalam campuran geopolimer. Selain itu, partikel yang lebih halus menghasilkan pembentukan zona transisi antar muka menjadi lebih tinggi dan

mengakibatkan meningkatnya kekuatan ikatan (Lee dan van Deventer, 2002) .

2.5 Pengukuran pH Geopolimer

pH merupakan parameter penting untuk mengetahui tingkat kebasaaan dari suatu beton. Kerusakan beton seringkali terjadi akibat penurunan tingkat kebasaaan yang ditandai dengan penurunan nilai pH. Tingkat kebasaaan suatu beton memiliki hhubungan erat dengan ketahanan suatu beton terhadap korosi, karbonasi dan serangan asam. Semen portland (OPC) umumnya memiliki pH antara 12,5-13 (Deschner dkk., 2012). Penambahan konsentrasi NaOH tidak berpengaruh secara signifikan pada pH geopolimer yang dihasilkan. Namun, nilai pH itu cenderung turun dengan adanya pemasukan klorida, karbonasi dan serangan asam (Neville, 1996). Masuknya klorida dapat menurunkan pH karena pembentukan asam klorida dalam beton. Sedangkan, karbonasi yaitu proses perubahan kalsium oksida dalam beton yang diubah menjadi kalsium karbonat, dapat menurunkan pH beton hingga kurang dari 9 (McPolin dkk., 2009). Penurunan pH beton menyebabkan adanya inisiasi korosi pada tulangan beton yang mengandung rangka besi (Feldmann, 2008). Hal ini menyebabkan adanya pengembangan metode pada pengukuran beton untuk kondisi yang berbeda.

Pengukuran pH untuk beton geopolimer sesuai dengan ASTM D1067-92. Metode ini digunakan untuk mengukur beton yang telah mengeras dengan cara menghancurkannya terlebih dahulu. Hasil pecahan kecil beton kemudian *dileaching* dalam air untuk membebaskan OH^- dalam beton. Kemudian dilanjutkan dengan pengukuran pH secara tidak langsung menggunakan metode titrasi. Metode titrasi dipilih dibandingkan menggunakan pH meter karena dirasa memiliki ketelitian yang lebih tinggi.

2.6 Kuat Tekan

Kuat tekan adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan persatuan luas. Kuat tekan suatu beton mengindikasikan mutu dan kualitas dari struktur beton. Semakin baik suatu struktur beton

maka kuat tekan yang dihasilkan akan semakin tinggi. Nilai kuat tekan didapat dari pengujian standar dengan alat uji universal. Dimensi benda uji berbentuk silinder dengan rasio tinggi dan diameter sebesar 2:1, sedangkan untuk benda uji berbentuk kubus memiliki dimensi dengan rasio panjang : tinggi : lebar sebesar 1:1:1. Pengujian kuat tekan dilakukan sesuai standar SNI yaitu minimal pada saat beton berusia 7 hari pemeraman (Badan Standarisasi Nasional, 2011), atau dapat dilakukan sesuai ASTM C39-86, kuat tekan dilakukan pada saat beton berusia 28 hari.

Rumus untuk menentukan nilai kuat tekan berdasarkan percobaan dapat dilihat pada persamaan 2.2.

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (2.2)$$

Dimana: f_c' = kuat tekan (MPa)
 P = Beban tekan (N)
 A = luas penampang benda uji (mm²)

Agregat beton merupakan penyusun beton yang harus diperhatikan. Hal itu disebabkan karena agregat mencapai 70-75% volume beton. Beton mempunyai kuat tekan yang tinggi jika penyusun beton berada dalam kualitas yang baik (Badan Standarisasi Nasional, 2011).

2.7 XRD (X-Ray Diffraction)

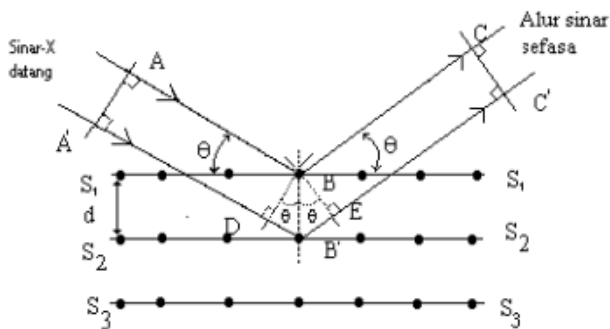
Analisis fasa struktur, komposisi dan keadaan polikristalin suatu geopolimer dapat diketahui melalui XRD menggunakan prinsip kerja sinar X. Wilhelm Conrad Rontgen pertama kali menemukan sinar X pada tahun 1895, di Universitas Wurtzburg, Jerman. Sinar X dihasilkan dari tumbukan antara elektron berkecepatan tinggi dengan logam target (Asmuni, 2000). Pengaplikasian dari alat ini digunakan untuk menganalisis puncak-puncak (peak) kristalin, studi variasi suhu, pengukuran presisi dari konstanta lattice (kisi-kisi), regangan sisa serta pemurnian. Hubungan antara panjang gelombang sinar X (λ), sudut difraksi (2θ)

dan jarak tiap bidang atomic kristal (d) dapat dijelaskan menggunakan persamaan Bragg:

$$n.\lambda = 2.d.\sin \theta \quad (2.3)$$

Dimana n adalah tingkat difraksi, d adalah jarak antara bidang kristal, λ adalah panjang gelombang sinar-X dan θ adalah sudut difraksi.

Prinsip dasar kerja dari XRD yaitu pada saat material dikenai sinar X, maka intensitas sinar yang di transmikan lebih rendah dari sinar yang datang. Hal ini terjadi disebabkan terjadinya adanya penyerapan oleh material dan juga adanya penghamburan oleh atom-atom yang berada pada material tersebut. Berkas sinar yang dihamburkan tersebut terdapat yang saling meniadakan karena memiliki fasa yang berbeda tetapi ada yang saling menguatkan karena memiliki fasa yang sama. Berkas sinar X yang memiliki fasa yang sama inilah yang disebut sebagai berkas difraksi.



Gambar 2. 7 Pantulan sinar x oleh bidang atom S_1S_1 dan S_2S_2 yang terpisah dengan jarak d

2.8 SEM (Scanning Electron Microscopy)

Analisis dengan SEM dilakukan untuk menyelidiki struktur mikro permukaan material geopolimer (termasuk porositas dan

pembentukan retakan), dan antar muka antara agregat dan matriks. SEM merupakan sejenis mikroskop yang menggunakan elektron sebagai pengganti cahaya untuk melihat benda dengan resolusi tinggi. *Electro gun* merupakan filamen yang dipanaskan dan mampu menghasilkan berkas sinar elektron. Gelombang elektron ini terkondensasi di lensa kondensor (*condenser lens*) dan terfokus sebagai titik yang jelas oleh lensa objektif (*objective lens*). *Scanning coil* yang diberi energi menyediakan medan magnetik bagi sinar elektron. Berkas sinar elektron yang mengenai cuplikan menghasilkan elektron sekunder dan kemudian dikumpulkan oleh detektor sekunder atau detektor *backscatter*. Gambar yang dihasilkan terdiri dari ribuan titik berbagai intensitas di permukaan CRT (*Cathode Ray Tube*) sebagai topografi Gambar. Sebuah ruang vakum diperlukan untuk preparasi cuplikan (Kroschwitz, 1990).

SEM memungkinkan untuk melakukan penelitian secara visual terhadap material dengan ukuran milimeter sampai nanometer yang dapat memberikan informasi tentang topografi dan diskripsi mekanik dari struktur material-material kristalin dan amorf (Duxson dkk., 2007). Morfologi dan struktur mikro sampel, baik abu layang maupun geopolimer digunakan untuk menjelaskan hubungan antara morfologi dengan sifat kimia, fisik, mekanik serta struktur kristalin dan amorf dari material (Komnitsas dan Zaharaki, 2007).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Alat dan Bahan

3.1.1. Alat

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini meliputi peralatan gelas dan non gelas. Peralatan gelas yang digunakan adalah gelas kimia ukuran 100 mL dan 250 mL, labu ukur 50 mL, erlenmeyer 250 mL, pipet volume 10 mL, pipet tetes, botol timbang dan gelas kimia 100 mL. Peralatan non gelas yang digunakan adalah gelas plastik, wadah plastik, bola hisap, ayakan 100 mesh, spatula besi, cetakan silinder dengan diameter 2 cm dan tinggi 4 cm, *mixer*, neraca analitik, oven, loyang aluminium, aluminium foil, plastik *wrap*, kertas pH universal dan plastik klip. Semua peralatan milik Laboratorium Kimia Material dan Energi

Instrumen analisis yang digunakan untuk karakterisasi adalah alat uji kuat tekan (*universal testing machine*), X-Ray Diffractometer (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Alat uji kuat tekan terdapat di Laboratorium Beton Teknik Infrastruktur Sipil, Instrumen SEM ada di Laboratorium Energi dan Lingkungan, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat ITS, sedangkan instrumen XRD ada di Laboratorium Material dan Metalurgi ITS.

3.1.2. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu layang dari PLTU PT. IPMOMI di Paiton Probolinggo, pelet natrium hidroksida (NaOH) p.a. dari Merck, Larutan Natrium silikat (Na_2SiO_3) teknis dari PT. Brataco, Aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) *reagent grade* dari Sigma-Aldrich, air demineralisasi (aqua DM), HCl 37%, indikator pp, indikator MO dan vaselin.

3.2. Prosedur Kerja

3.2.1. Preparasi Abu Layang

Preparasi abu layang dilakukan dengan cara mengayak abu layang dari PT. IPMOMI dengan ayakan 100 mesh dilanjutkan

dengan pengeringan di dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam. Kemudian, abu layang tersebut dibiarkan dingin dalam desikator. Pengeringan pada suhu 105°C berfungsi untuk menghilangkan kandungan air yang masih terdapat dalam abu layang.

3.2.2. Pembuatan Pengaktif basa

Larutan pengaktif basa dibuat dengan cara mencampurkan larutan NaOH dengan *waterglass*. Pada penelitian ini dilakukan variasi jumlah NaOH yang dicampurkan dengan *waterglass* (Na_2SiO_3) untuk mendapatkan konsentrasi NaOH sebesar 10, 11, 12, 13 dan 14 M. Komposisi massa NaOH yang digunakan dalam satu resep pengaktif basa disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1. Komposisi massa NaOH yang digunakan

Konsentrasi NaOH (Molar)	Massa pelet NaOH (g)	Kode sampel Geopolimer
10	20	Geo-A
11	22	Geo-B
12	24	Geo-C
13	26	Geo-D
14	28	Geo-E

Larutan NaOH ini dibuat dengan melarutkan pelet NaOH yang telah ditimbang ke dalam air di dalam beker plastik dengan pengadukan. Larutan yang terbentuk kemudian didiamkan selama 24 jam sebelum dicampurkan dengan *waterglass* untuk menjadi larutan pengaktif basa.

3.2.3. Persiapan Larutan Variasi S/L

Pembuatan geopolimer dengan variasi rasio S/L dilakukan dengan memvariasikan jumlah air yang ditambahkan dalam pembuatan larutan NaOH. Fase solid (S) adalah semua bahan yang memiliki fasa solid meliputi abu layang, *waterglass*, NaOH dan $\text{Al}(\text{OH})_3$, sedangkan fase liquid (L) adalah semua bahan yang

memiliki kandungan berfasa liquid (aqua DM yang digunakan dan air yang terdapat pada *waterglass*, NaOH dan $\text{Al}(\text{OH})_3$). Larutan NaOH dibuat dengan menimbang pelet NaOH sebesar 24 gram (untuk pH = 12 M) kemudian ditambahkan air sesuai dengan perhitungan pada persamaan berikut 3.1.

$$\text{Rasio S/L} = \frac{\text{FA} + (\text{WG} \times 71,06\%) + (\text{Al}(\text{OH})_3 \times 99\%) + (\text{NaOH} \times 99\%)}{(\text{WG} \times 28,94\%) + ((\text{Al}(\text{OH})_3 \times 1\%) + (\text{NaOH} \times 1\%) + \text{Aqua DM}} \quad (3.1)$$

Berdasarkan persamaan (3.1) dapat dihitung jumlah aqua DM yang harus ditambahkan dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 Komposisi massa aqua DM yang ditambahkan

Rasio S/L	Aqua DM yang ditambahkan (g)	Kode sampel Geopolimer
3,1	87,53	GeoSL-A
3,6	72,12	GeoSL-B
4,1	60,47	GeoSL-C
4,6	51,35	GeoSL-D

3.2.4. Persiapan Pencetakan Geopolimer

Preparasi cetakan geopolimer dilakukan dengan menutup bagian bawah cetakan dengan plastik wrap dan diikat dengan karet agar pasta geopolimer tidak mengalir ke luar cetakan melalui celah yang mungkin ada. Cetakan selanjutnya diolesi dengan vaselin agar geopolimer yang telah mengeras dapat dikeluarkan dengan mudah dari cetakan. Cetakan geopolimer dibuat dari PVC berbentuk silinder dengan diameter 2 cm dan tinggi 4 cm.

3.2.5. Sintesis Geopolimer

Sintesis Geopolimer dilakukan sesuai dengan komposisi yang telah dilakukan pada penelitian Fansuri dkk. (2015). Data komposisi tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Komposisi pembuatan geopolimer

Bahan	Nilai	Satuan
Abu layang PT. IPMOMI	260,0	gram
Pelet NaOH	28,0	gram
Al(OH) ₃	3,4	gram
Waterglass (Na ₂ SiO ₃)	80,0	gram
Total aqua DM (H ₂ O)	61,3	ml

Abu layang yang telah dipersiapkan selanjutnya ditambah dengan larutan pengaktif basa yang sebelumnya telah dicampurkan dengan larutan Al(OH)₃. Campuran tersebut diaduk dengan mixer selama 4 menit hingga campuran merata sempurna. Campuran yang telah tercampur merata kemudian dituangkan kedalam cetakan yang telah dipreparasi.

Pasta geopolimer yang telah berada dalam cetakan kemudian diketuk-ketuk dengan pelan untuk mengeluarkan gelembung udara yang masih terdapat dalam pasta geopolimer. Bagian atas cetakan selanjutnya ditutup menggunakan plastik *wrap*. Proses *setting* dilakukan pada suhu ruang selama 24 jam. Geopolimer yang sudah mengeras kemudian dikeluarkan dari cetakan dan dimasukkan ke dalam plastik klip yang selanjutnya dipanaskan di dalam oven pada suhu 55 °C selama 24 jam.

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian Fansuri dkk (2015) adalah adanya variasi NaOH yang ditambahkan sesuai dengan Tabel 3.1. dengan variasi waktu *curing* selama 7 dan 28 hari. Pada penelitian ini juga dilakukan variasi rasio solid/liquid sesuai dengan Tabel 3.2. Variasi rasio solid/liquid dilakukan dengan adanya perbedaan jumlah air yang ditambahkan.

3.2.6. Standarisasi HCl

Standarisasi HCl dilakukan sebelum pengukuran pH geopolimer dikerjakan. Standarisasi HCl ini dilakukan dengan menggunakan NaOH yang sebelumnya telah distandarisasi menggunakan asam oksalat (H₂C₂O₄). Larutan NaOH dibuat terlebih dahulu dengan melarutkan 0,4053 gram NaOH dalam 100

mL aquades. Larutan NaOH tersebut kemudian di standarisasi dengan larutan asam oksalat 0,1 M. Diambil 10 mL larutan NaOH kemudian ditetesi indikator pp. Larutan tersebut kemudian dititrasi dengan larutan asam oksalat 0,1 M dan dicatat volume asam oksalat yang di peroleh. Standarisasi NaOH diulang sebanyak 3 kali kemudian dihitung konsentrasi NaOH menggunakan persamaan 3.2.

$$C_{\text{NaOH}} = \frac{V_{\text{asam Oksalat}} \times N_{\text{asam Oksalat}}}{V_{\text{NaOH}}} \quad (3.2)$$

Larutan NaOH yang telah distandarisasi kemudian digunakan untuk menyetandarisasi larutan HCl. Larutan HCl dibuat dengan mengencerkan HCl 37% menjadi larutan HCl 0,01M. Setelah itu, Larutan yang telah dibuat, dipipet sebanyak 10 mL dan dipindahkan ke dalam erlenmeyer 100 mL. Kemudian larutan tersebut digunakan untuk standarisasi konsentrasi NaOH yang selanjutnya digunakan sebagai titran. Proses standarisasi diulangi sebanyak 3 kali dan dihitung konsentrasi larutan HCl menggunakan persamaan 3.3.

$$C_{\text{HCl}} = \frac{V_{\text{NaOH}} \times N_{\text{NaOH}}}{V_{\text{HCl}}} \quad (3.3)$$

3.2.7. Pengujian pH Geopolimer

Pengujian pH dilakukan untuk mengetahui pH pada beton geopolimer sesuai ASTM D 1067-92. Pengujian dilakukan pada geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH yang telah berhasil disintesis dan memiliki umur 7 hari. Geopolimer yang telah disintesis dihancurkan dan dihaluskan menggunakan alu dan mortar.

Geopolimer yang telah halus kemudian dilarutkan ke dalam aquades dengan perbandingan 1:2 dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 menit. Setelah itu, campuran geopolimer disaring untuk mendapatkan filtrat. Filtrat ditetesi indikator *fenolftalein* (PP) sebagai indikator titrasi asam-basa. Titrasi

dilakukan dengan larutan HCl 0,01 M sebagai titran dan diamati ketika terjadi perubahan warna dari warna merah muda menjadi tidak berwarna. Dicatat volume tersebut sebagai V_{pn} .

Setelah itu, hasil titrasi pertama ditambahkan indikator *metil orange* (MO) dan dititrasi kembali hingga terjadi perubahan warna dari warna kuning menjadi jingga. Volume tersebut dicatat sebagai V_T . Konsentrasi OH^- dihitung sesuai persamaan 3.4. Kemudian didapatkan pH dengan persamaan 3.5.

$$[OH^-] = \frac{0,01 (2xV_{PN} - V_T)}{V_o} \quad (3.4)$$

$$pH = 14 - \log[OH^-] \quad (3.5)$$

3.3. Karakterisasi

3.3.1. Waktu Setting (Setting time)

Waktu setting geopolimer diukur dengan menggunakan alat jarum vicat untuk mengetahui kecepatan geopolimer dalam mengeras. Sampel pasta geopolimer yang telah dituangkan dalam cetakan silinder kemudian diukur kedalaman dengan jarum vicat pada waktu 0 menit hingga 90 menit dengan selang waktu 15 menit.

3.3.2. Uji Kuat Tekan

Sifat mekanik geopolimer ditentukan dengan pengujian kuat tekan. Sebelum dilakukan pengujian, sampel geopolimer yang telah selesai *curing* diratakan permukaannya. Geopolimer diuji menggunakan *universal testing machine* di Laboratorium Beton Departemen Teknik Infrastruktur Sipil ITS.

Pengujian kuat tekan geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH dilakukan dengan 3 kali, pada usia 7 dan 28 hari. Sampel geopolimer dengan variasi rasio solid/liquid diuji pada usia *curing* 7 hari. Beban yang diberikan pada pengujian geopolimer ini dalam satuan kilo Newton yang kemudian dikonversi dalam satuan Mpa sesuai dengan persamaan

$$f'c = \frac{P}{A} = \frac{\text{Gaya (kN)} \times 10^{-3}}{\pi r^2 \times 10^{-4}} \quad (3.5)$$

3.3.3. Analisa X-Ray Diffraction (XRD)

Analisis fasa dan kandungan mineral geopolimer dilakukan menggunakan alat XRD merk Expert analytical yang terdapat di laboratorium Teknik Material dan Metalurgi ITS. Kondisi operasional difraktogram sinar-X adalah dengan sumber sinar $\text{CuK}\alpha 1$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), tegangan arusnya sebesar 40 kV dan 30 mA, dengan kecepatan 2° per menit dan sudut difraksi $2\theta = (5-90)^\circ$

3.3.4. Analisa Morfologi Geopolimer dengan SEM

Analisa morfologi geopolimer dilakukan dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) Zeiss EVO MA-10. Analisa menggunakan SEM dilakukan pada sampel geopolimer yang memberikan hasil kuat tekan terbaik dan terendah, yaitu pada sampel Geo-C (variasi NaOH 12M) dan Geo-A (Variasi NaOH 10 M).

Beton geopolimer dihaluskan permukaannya dengan menggunakan amplas kemudian dimasukkan ke dalam cetakan. Selanjutnya, resin epoksi masukkan ke dalam cetakan lalu dibiarkan hingga 24 jam hingga resin mengeras. Setelah resin mengeras, permukaan geopolimer di potong untuk menyingkap permukaan lintang geopolimer dengan cara diampelas menggunakan kertas amplas No. 600 dan dihaluskan lebih lanjut dengan kertas amplas No. 1200. Sampel geopolimer kemudian dilapisi dengan *aloy* emas-paladium untuk memaksimalkan resolusi gambar.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Sintesis Geopolimer

4.1.1 Penentuan Konsentrasi Optimum NaOH dalam Larutan Pengaktif basa

Larutan pengaktif basa adalah larutan yang dibuat dengan mencampurkan NaOH dengan *waterglass* (Natrium silikat/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3(\text{aq})$). Larutan pengaktif basa berperan dalam proses awal geopolimerisasi yaitu pada saat pelarutan silikon menjadi SiO_4^{4-} dan aluminium menjadi AlO_4^{5-} dari abu layang yang dilanjutkan dengan pembentukan polimer $[-(\text{TO}_4)-]_n$ dimana T adalah Si^{4+} atau Al^{3+} . Campuran natrium silikat dengan NaOH dipilih karena dapat meningkatkan kekuatan geopolimer dibandingkan hanya menggunakan NaOH sebagai pengaktif basa. Campuran alkali silikat menginduksi sejumlah tertentu SiO_2 untuk membentuk monomer, dimer dan oligomer (Singh dkk., 2015). Selain itu, alkali silikat berperan sebagai pengikat dan sebagai penambah komposisi ion-ion silikat dalam campuran geopolimer. NaOH berperan dalam pelarutan ion-ion silikat dan aluminat dari abu layang (Komnitsas dan Zaharaki, 2007). Selain itu, NaOH juga berperan untuk menjaga pH tinggi yang diperlukan agar ion-ion silikat dan khususnya aluminat berada dalam struktur tetrahedral.

Hal itu berkaitan dengan struktur ion aluminat yang akan memiliki struktur oktahedral pada pH rendah, sedangkan proses geopolimerisasi hanya dapat terjadi apabila ion-ion silikat dan aluminat berada dalam struktur tetrahedral. Menurut Fansuri dkk. (2010) dan Hamidi dkk. (2016) semakin tinggi konsentrasi NaOH semakin banyak pula ion silikat dan aluminat yang dapat terlarut dari abu layang. Sehingga dapat meningkatkan kekuatan geopolimer yang dihasilkan. Pada penelitian ini dilakukan variasi konsentrasi NaOH yang ditambahkan dalam proses geopolimerisasi untuk mengetahui konsentrasi optimum agar mendapatkan geopolimer dengan kekuatan yang terbaik. Konsentrasi NaOH yang ditambahkan dimulai dari 10 sampai 14 M.

Waterglass yang digunakan pada penelitian ini adalah *waterglass* Brataco yang oleh Nurkholifah (2019) telah diuji kandungan Na_2O dan SiO_2 . Kandungan Na_2O dan SiO_2 dalam *waterglass* Brataco berturut-turut sebesar 19,35%, 28,69%, dan sisanya adalah air. Kandungan Na_2O dan SiO_2 pada *waterglass* Brataco dibandingkan dua *waterglass* lainnya disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Kadar Na_2O , SiO_2 dan H_2O pada *waterglass* (Nurkholifah, 2019)

Komponen	Waterglass		
	Brataco	Omya	Sinar mas
SiO_2	28,69%	25,88%	27,68%
Na_2O	19,35%	14,58%	14,63%

Tabel 4. 2 komposisi resep geopolimer

Kode senyawa	Abu layang	NaOH	$\text{Al}(\text{OH})_3$	<i>Water glass</i>	Aqua DM
Geo-A	260 g	20 g	3,4 g	80 g	61,85 g
Geo-B	260 g	22 g	3,4 g	80 g	61,85 g
Geo-C	260 g	24 g	3,4 g	80 g	61,85 g
Geo-D	260 g	26 g	3,4 g	80 g	61,85 g
Geo-E	260 g	28 g	3,4 g	80 g	61,85 g

Tabel 4. 3 Rasio mol dalam geopolimer

Kode Sampel	Geo-A	Geo-B	Geo-C	Geo-D	Geo-E
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	6,797	6,797	6,797	6,796	6,797
$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,196	0,206	0,215	0,224	0,234
$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,332	1,396	1,462	1,527	1,593
$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	9,375	8,938	8,541	8,179	7,846

Proses sintesis geopolimer menggunakan komposisi yang telah dilaporkan oleh Anisatun (2014), tetapi dengan variasi komposisi NaOH sebagaimana yang ditampilkan pada Tabel 4.2.

Berdasarkan komposisi resep tersebut didapatkan rasio perbandingan mol yang digunakan dalam sintesis geopolimer sebagaimana yang ditampilkan pada Tabel 4.3.

Sebelum dicampurkan dengan larutan pengaktif basa, abu layang ditambahkan dengan larutan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Hal tersebut dilakukan untuk menambah spesi Al yang terkandung dalam abu layang. Proses penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dilakukan sebelum ditambahkan dengan larutan pengaktif basa agar campuran menjadi homogen dan memperkaya kandungan Al dalam abu layang. Setelah itu, campuran abu layang dan $\text{Al}(\text{OH})_3$ ditambahkan dengan larutan pengaktif basa dan diaduk menggunakan *mixer* selama 4 menit. Adonan geopolimer tersebut kemudian dituang dalam cetakan silinder yang telah disiapkan. Adonan geopolimer tersebut kemudian digetarkan untuk menghilangkan gelembung yang terperangkap dalam adonan. Gelembung yang terperangkap dalam geopolimer akan menyebabkan terciptanya pori pada jaringan geopolimer dan menurunkan kuat tekan geopolimer. Cetakan yang berisi adonan geopolimer tersebut kemudian didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang untuk proses pengeringan. Setelah 24 jam, geopolimer dikeluarkan dari cetakan dan dioven pada suhu $55\text{ }^\circ\text{C}$ agar air pada geopolimer tidak menguap dengan cepat.

4.1.2 Penentuan Rasio Solid/Liquid

Beragamnya jenis abu layang membuat optimasi dalam proses pembuatan geopolimer perlu dilakukan. Selain pengaktif basa, rasio padatan/cairan (S/L) merupakan hal yang penting untuk diperhatikan dalam proses pembuatan geopolimer. Rasio S/L didefinisikan sebagai perbandingan jumlah total massa padatan dibandingkan dengan jumlah total air (Sautsos dkk., 2016).

Pada penelitian ini, penentuan rasio S/L dilakukan dengan variasi antara 3,1 dan 4,6 yang didasari dari penelitian supriadi (2017). Penentuan rasio S/L kuat kaitannya dengan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$. Yao dkk. (2009) menjelaskan bahwa rasio S/L yang tinggi akan menghasilkan viskositas pasta geopolimer yang tinggi dan rasio S/L yang tinggi akan mempercepat waktu dalam proses

geopolimerisasi. Zuhua dkk. (2009) juga menjelaskan bahwa rasio S/L yang rendah dapat mempercepat proses pelarutan sumber aluminosilikat, tetapi hal tersebut tidak baik dalam proses polikondensasi pada konsentrasi NaOH yang tinggi. Hardjito dan Rangan (2005) melaporkan bahwa kuat tekan geopolimer meningkat dengan peningkatan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$. Sehingga diperlukan penentuan rasio S/L dengan perubahan konsentrasi NaOH yang digunakan dalam proses sintesis geopolimer.

Tabel 4. 4 Hubungan rasio S/L dengan viskositas (Supriadi, 2017)

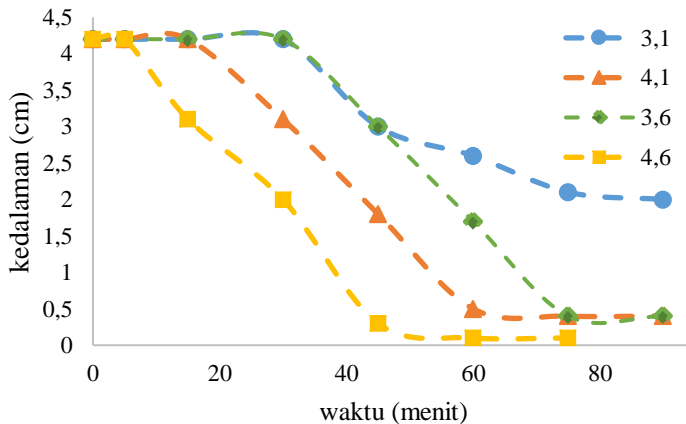
No	Rasio S/L	Viskositas (cps)	Karakteristik
1	2,57	160	Sangat encer mudah dicetak
2	2,98	280	Encer bisa dicetak
3	3,18	360	Encer mudah dicetak
4	3,39	375	Encer mudah dicetak
5	3,59	440	Encer mudah dicetak
6	3,79	670	kental mudah dicetak
7	4,00	880	Sangat kental bisa dicetak
8	4,61	2000	Sangat kental sulit dicetak

Pada penelitian ini dilakukan variasi rasio S/L mulai dari 3,1 sampai 4,6. Berdasarkan hasil pengamatan rasio S/L 3,1 dan 3,6 menghasilkan campuran yang encer dan mudah dituang ke dalam cetakan sedangkan untuk rasio S/L 4,1 dan 4,6 menghasilkan campuran yang kental tetapi masih dapat dituang ke dalam cetakan. Semakin tinggi rasio S/L pasta geopolimer semakin sulit mengalir karena fasa padatan jauh lebih banyak dalam pasta. Sebaliknya, jika rasio S/L rendah maka membutuhkan waktu pengeringan yang jauh lebih lama. Hal tersebut berbanding lurus dengan pernyataan Supriadi (2017), semakin tinggi rasio S/L pasta geopolimer menjadi sulit dicetak tetapi memiliki adesi yang lebih baik, waktu pengeringan menjadi lebih cepat, porositas geopolimer menjadi lebih sedikit dan memiliki kuat tekan yang lebih baik. Hasil laju pengeringan geopolimer (*setting time*) ditampilkan pada Tabel 4.5

Selain itu Davidovits (1991) menjelaskan bahwa semakin tinggi rasio S/L pasta geopolimer semakin sulit diaduk dan pasta geopolimer menjadi susah untuk homogen. Supriadi (2017) melaporkan hubungan viskositas dan rasio S/L dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.5 Hubungan rasio S/L dengan waktu pengeringan geopolimer

Rasio S/L	3,1 (cm)	3,6 (cm)	4,1 (cm)	4,6 (cm)
0 menit	4,2	4,2	4,2	4,2
5 menit	4,2	4,2	4,2	4,2
15 menit	4,2	4,2	4,2	3,1
30 menit	4,2	4,2	3,1	2
45 menit	3	3	1,8	0,3
60 menit	2,6	1,7	0,5	0,1
75 menit	2,1	0,4	0,4	0,1
90 menit	2	0,4	0,4	>0,1



Gambar 4. 1 Grafik hubungan rasio S/L dengan waktu *setting*

Gambar 4.1 menampilkan kecepatan geopolimer dalam mencapai waktu *setting*. Waktu *setting* adalah waktu yang dibutuhkan geopolimer untuk mengeras dari keadaan encer.

Berdasarkan hasil pengukuran waktu *setting* geopolimer, menunjukkan bahwa laju pengerasan geopolimer semakin cepat dengan bertambahnya rasio S/L. hal itu dikaitkan dengan viskositas pasta geopolimer yang bertambah sehingga reaksi geopolimerisasi tidak berjalan efisien karena kekurangan jumlah air pada pasta geopolimer dan membuat waktu *setting* menjadi lebih cepat. Perhitungan nilai rasio S/L dilakukan dengan mengurangi jumlah air yang ditambahkan dalam proses pembuatan pasta geopolimer. Jika jumlah air yang ditambahkan semakin berkurang maka, jumlah abu layang yang bereaksi akan semakin sedikit dan kuat tekan geopolimer yang dihasilkan akan berkurang.

4.2 Kuat Tekan Geopolimer

4.2.1 Hasil Kuat Tekan Geopolimer dengan Variasi Komposisi NaOH

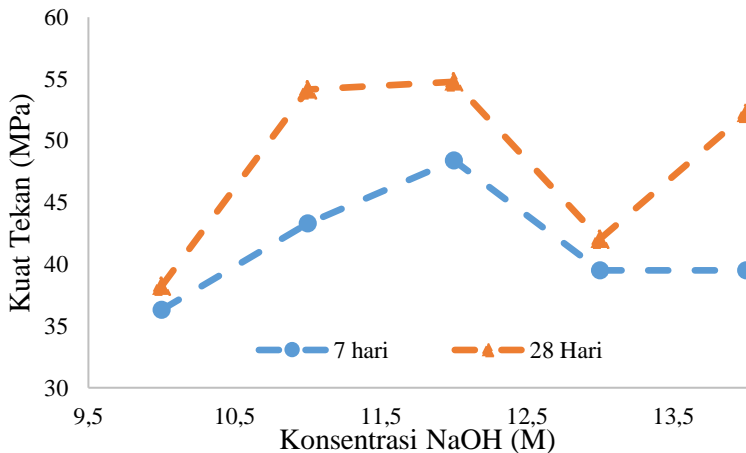
Pengukuran kuat tekan geopolimer dilakukan setelah 7 dan 28 hari waktu pemeraman. Hal ini dilakukan untuk mengetahui batas optimum konsentrasi NaOH terhadap kuat tekan geopolimer yang dihasilkan. Kuat tekan geopolimer merupakan indikasi mutu sebuah struktur dimana semakin tinggi kekuatan tekannya, semakin tinggi pula kualitas geopolimer yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian Balczar dkk. (2015) kuat tekan suatu bahan akan meningkat dengan meningkatnya umur bahan tersebut, namun pada geopolimer, kuat tekannya tidak banyak berubah dari kuat tekan pada umur 7 hari. Pengujian dilakukan dengan mesin *universal testing machine*. Sebelum dilakukan kuat tekan, sampel geopolimer dihaluskan bagian bawah dan atas agar memiliki permukaan yang rata dan seimbang pada saat pengujian. Sampel uji memiliki tinggi 4 cm dengan diameter 2 cm sesuai dengan SNI 1974:2011 tentang cara uji kuat tekan beton pada benda silinder. Secara lengkap hasil kuat tekan dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 menunjukkan variasi konsentrasi NaOH memberikan pengaruh pada kuat tekan yang dihasilkan geopolimer. Sementara grafik perubahan nilai kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 4.2. Berdasarkan Tabel 4.6, penambahan konsentrasi NaOH

hingga konsentrasi 12 M menyebabkan peningkatan pada kuat tekan geopolimer. Namun, pada konsentrasi 13 dan 14 M kuat tekan mengalami penurunan. Nilai kuat tekan tertinggi didapatkan dengan penambahan konsentrasi NaOH 12 M dengan nilai kuat tekan sebesar 48,4 Mpa pada 7 hari dan sebesar 54,7 Mpa pada 28 hari.

Tabel 4. 6 Hubungan kuat tekan Geopolimer variasi konsentrasi NaOH dari 5 sampel geopolimer

Kode sampel	Konsentrasi NaOH (M)	Na ₂ O/SiO ₂	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	Kuat tekan (MPa)	
				7 hari	28 hari
Geo-A	10	0,196	1,332	36,3	38,21
Geo-B	11	0,206	1,396	43,31	54,14
Geo-C	12	0,215	1,462	48,4	54,77
Geo-D	13	0,224	1,527	39,49	42,03
Geo-E	14	0,234	1,593	39,49	52,22



Gambar 4. 2 Grafik kuat tekan geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH

Mekanisme reaksi geopolimerisasi yang diusulkan oleh Xu dan Van Deventer (2000) menggunakan teori pasangan elektron

menyebutkan bahwa NaOH berfungsi untuk melarutkan mineral aluminosilikat pada permukaan abu layang sehingga terbentuk monomer aluminat ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) dan monomer silikat ($\text{Si}(\text{OH})_4$). Monomer tersebut kemudian akan saling bergabung membentuk rantai Si-O-Al dengan bantuan kation Na^+ . Penambahan kadar NaOH yang tinggi akan meningkatkan kadar kelarutan sumber oksida aluminosilikat sehingga meningkatkan pembentukan geopolimer yang dapat mengenkapsulasi abu layang yang tidak dapat larut dan mengikatnya membentuk matriks yang kompak (Zheng dkk., 2010). Hal itulah yang menyebabkan kenaikan kuat tekan geopolimer dari sampel Geo-A, Geo-B dan Geo-C. Namun, penambahan konsentrasi NaOH yang terlalu tinggi, akan menyebabkan proses geopolimerisasi menjadi terganggu akibat kelebihan ion OH^- yang menyebabkan reaksi berjalan kurang efisien (Hamidi dkk., 2016), sehingga kuat tekan geopolimer pada konsentrasi 13 M dan 14 M menjadi menurun. Adanya partikel kasar dalam abu layang juga menyebabkan penurunan kuat tekan geopolimer. Partikel kasar dalam abu layang akan mengurangi luas permukaan komponen amorf yang terpapar ke larutan pengaktif basa (Kumar dkk., 2015). Hal Ini menyebabkan reaksi geopolimerisasi tidak berlangsung secara efisien akibat adanya pelarutan sebagian pada permukaan partikel kasar abu layang. Akibatnya, partikel yang tidak bereaksi ini akan menunjukkan titik lemah antara matriks geopolimer yang akibatnya mengurangi kekuatan tekan spesimen geopolimer (Hadi dkk., 2018). Kuat tekan geopolimer juga meningkat dengan semakin lamanya waktu peram. Hal tersebut menunjukkan bahwa NaOH dalam geopolimer belum habis bereaksi dan terus melaksanakan fungsinya untuk melarutkan sebagian silika dan alumina yang belum bereaksi pada awal reaksi geopolimerisasi. Sehingga, hal itu dapat meningkatkan kuat tekan geopolimer.

4.2.2 Hubungan Kuat Tekan dengan Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

Perubahan komposisi NaOH yang ditambahkan dalam pasta geopolimer secara otomatis juga akan mengubah rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dalam pasta geopolimer. Chindaprasirt dkk. (2007)

mengaitkan kemampuan kerja dan kekuatan geopolimer dari campuran pasir dan abu layang tinggi kalsium (kelas C) dengan konsentrasi natrium silikat dan natrium hidroksida dalam gel geopolimer. Mereka menemukan bahwa kemampuan kerja gel dan kekuatan geopolimer tergantung pada jumlah natrium silikat dan natrium hidroksida yang ada dalam campuran. Secara lengkap hubungan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dan kuat tekan ditampilkan pada Tabel 4.7.

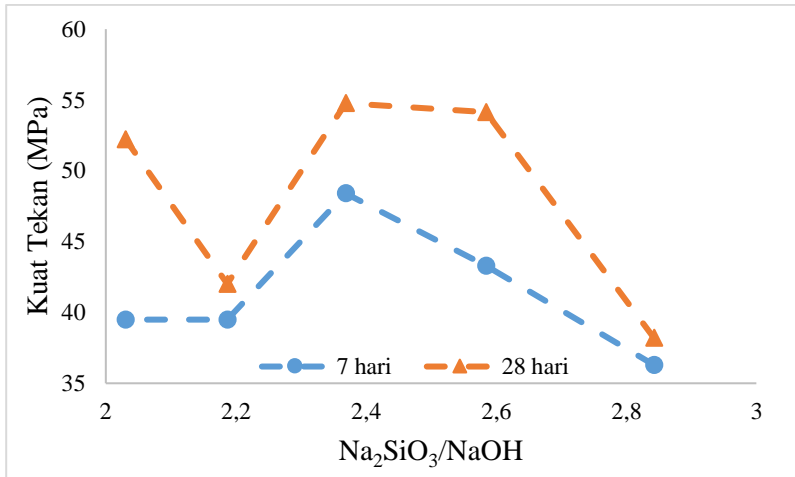
Berdasarkan Tabel 4.7 semakin kecil rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ maka kuat tekan yang dihasilkan semakin besar hingga rasio 2,36 dan menurun dengan rasio dibawah 2,36. Namun perlu dipahami bahwa tren hubungan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dan kuat tekan tersebut adalah khas untuk setiap sumber aluminosilikat. Variasi efek dari rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ pada kuat tekan geopolimer bergantung pada distribusi oksida yang terdapat dalam abu layang (Hadi dkk. 2018). Kuat tekan tertinggi didapatkan pada rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 3,33 dengan kuat tekan sebesar 54,77 MPa. Sementara rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ memberikan kuat tekan terendah dengan nilai kuat tekan sebesar 38,21 MPa.

Tabel 4. 7 Hubungan kuat tekan variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

Kode sampel	NaOH (g)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Kuat Tekan (MPa)	
			7 hari	28 hari
Geo-A	20	2,84	36,3	38,21
Geo-B	22	2,58	43,31	54,14
Geo-C	24	2,36	48,4	54,77
Geo-D	26	2,18	39,49	42,03
Geo-E	28	2,03	39,49	52,22

Keseimbangan kimia antara SiO_2 amorf dan Al_2O_3 amorf merupakan salah satu faktor yang mengendalikan reaksi geopolimerisasi. Pengurangan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dalam pasta menyebabkan NaOH akan meningkat dan konsentrasi SiO_2 dan

Al_2O_3 yang larut akan meningkat. SiO_2 dan Al_2O_3 yang larut akan membuat intermediet $\text{Si}(\text{OH})_4$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ meningkat dan meningkatkan kuat tekan geopolimer. Rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ mengontrol jumlah SiO_2 dan Al_2O_3 yang dibebaskan dari abu layang dalam matriks geopolimer (Bakrie dkk., 2013). Oleh karena itu, peningkatkan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ meningkatkan jumlah ion Si^{4+} dan Na^+ yang dibebaskan dari Na_2SiO_3 . Ion Si^{4+} dan Na^+ tersebut akan memenuhi matriks dengan ion bebas yang menghambat proses geopolimerisasi. Lebih lanjut, dengan bertambahnya natrium silikat akan menambah porositas campuran geopolimer terutama jika diperam pada suhu yang tinggi (Hadi dkk., 2018)



Gambar 4. 3 Grafik hubungan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dengan kuat tekan geopolimer

4.2.3 Kuat Tekan Geopolimer dengan Variasi Rasio S/L

Rasio S/L merupakan salah satu faktor yang berpengaruh pada kekuatan tekan geopolimer. Rasio S/L berpengaruh dalam proses geopolimerisasi, karena air merupakan media dalam proses polikondensasi. Penentuan rasio S/L dilakukan dengan konsentrasi NaOH sebesar 12 M dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,36. Data

kekuatan tekan geopolimer dengan berbagai rasio S/L ditampilkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Hubungan kuat tekan geopolimer dengan variasi rasio S/L

Kode sampel	Rasio S/L	7 hari (MPa)
GeoSL-A	3,1	43,95
GeoSL-B	3,6	44,59
GeoSL-C	4,1	42,04
GeoSL-D	4,6	36,94

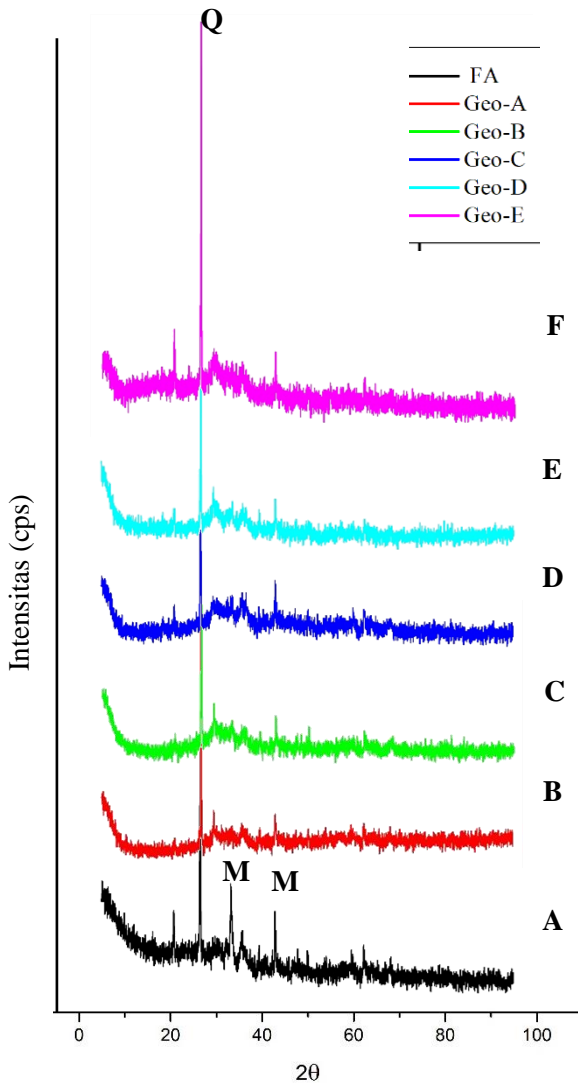
Kuat tekan tertinggi diperoleh pada rasio S/L 3,6 dengan kuat tekan sebesar 44,59 MPa. Kuat tekan terendah diperoleh pada rasio S/L sebesar 4,6. Semakin besar nilai rasio S/L maka fase solid menjadi lebih banyak sehingga jumlah aluminosilikat yang larut menjadi lebih sedikit dan sehingga kuat tekan geopolimer menjadi berkurang (Duxson dkk., 2005). Penurunan kuat tekan geopolimer dengan peningkatan rasio S/L juga dihubungkan dengan kurangnya jumlah pengaktif basa untuk melarutkan abu layang, sehingga terbentuk pasta geopolimer yang lemah dengan struktur yang tidak homogen (Hadi dkk., 2018). Sebaliknya, dengan berkurangnya nilai S/L maka fase liquid dalam pasta geopolimer tinggi, sehingga menyebabkan banyak pori yang terbentuk pada saat proses pemeraman geopolimer. Banyaknya pori menyebabkan berkurangnya kuat tekan geopolimer. Fansuri dkk. (2010) menjelaskan bahwa, air merupakan media untuk silikat dan aluminat yang terlarut untuk berpolimerisasi. Proses polimerisasi dalam geopolimer termasuk proses polimerisasi kondensasi yang menghasilkan air sebagai hasil samping reaksi. Jumlah air yang berlebih akan mengurangi laju kondensasi dengan cara memodifikasi keadaan setimbang dari reaksi. Lebih lanjut, kelebihan air dalam pasta geopolimer menyebabkan terjadinya pemisahan dalam campuran geopolimer.

4.3 Analisa Fasa Geopolimer menggunakan XRD

Analisa fasa geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH dilakukan menggunakan XRD. Analisa dilakukan pada geopolimer yang telah berusia 7 hari. Keberadaan fasa kristal ditandai dengan adanya puncak-puncak tajam, sedangkan, fasa amorf ditandai dengan adanya gundukan (*hump*). Hasil analisa XRD ditampilkan pada Gambar 4.4.

Pada Gambar 4.4 di bawah terlihat adanya fasa kuarsa yang ditandai dengan Q, dan mullite yang ditandai dengan M. Kuarsa dan mullite merupakan oksida utama yang terkandung pada abu layang. Hasil difraktogram pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa, fasa kuarsa (SiO_2) tetap terdapat pada semua sampel dengan intensitas tertinggi pada $2\theta = 26,67^\circ$ dan puncak kuarsa lainnya yang muncul pada $2\theta = 20,78^\circ$, $36,51^\circ$ dan $50,13^\circ$. Fasa *mullite* ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) juga terdeteksi pada $2\theta = 42,36^\circ$ sedangkan puncak *mullite* pada $2\theta = 33,28^\circ$ hanya terdapat pada abu layang dan hilang ketika telah menjadi geopolimer. Perbedaan difraktogram abu layang dan sampel geopolimer yang ditambah dengan NaOH adalah menurunnya intensitas kuarsa dan hilangnya puncak mullite pada $2\theta = 33,28^\circ$ digantikan dengan adanya gundukan pada $2\theta = 26^\circ$ hingga 38° . Adanya gundukan ini menandakan adanya perubahan dari fasa kristal menjadi fasa amorf baru akibat adanya penambahan NaOH. Hal ini menandakan matriks geopolimer telah berhasil dibentuk dengan munculnya amorf baru akibat adanya pelarutan silika dan alumina amorf dan pelarutan sedikit kristal kuarsa dan mullite pada abu layang oleh larutan pengaktif basa.

Fasa kristal kuarsa $2\theta=26,67^\circ$ mengalami penurunan intensitas dari sampel Geo-A, Geo-B dan Geo-C, kemudian mengalami kenaikan intensitas pada sampel Geo-D dan Geo-E. Nilai penurunan kristalinitas geopolimer dapat dihitung dengan menggunakan kristalinitas relatif, sesuai dengan Tabel 4.9. nilai kristalinitas geopolimer relatif dihitung dengan menjumlahkan intensitas puncak khas kristal kuarsa dan mullite geopolimer kemudian dibandingkan dengan intensitas puncak khas kristal kuarsa dan mullite pada abu layang.



Gambar 4. 4 Difraktogram sinar-X sampel: (A) Abu layang PT. IPMOMI, (B) Geo-A, (C) Geo-B, (D) Geo-C, (E) Geo-D dan (F) Geo-E

Tabel 4. 9 Data kristalinitas relatif geopolimer

2 θ	Intensitas (cps)					
	FA	Geo-A	Geo-B	Geo-C	Geo-D	Geo-E
26,67	667,07	584,17	299,45	241,6	406,34	800,34
29,52	54,64	67,15	62,63	25,97	61,66	43,15
36,51	54,64	29,8	24,61	33,69	26,38	30,04
33,28	170,89	29,8	35,56	20,65	26,38	54,74
42,36	120,47	52,4	63,32	79,57	73,55	73,88
Total	1067,7	763,3	485,5	401,4	594,3	1002,1

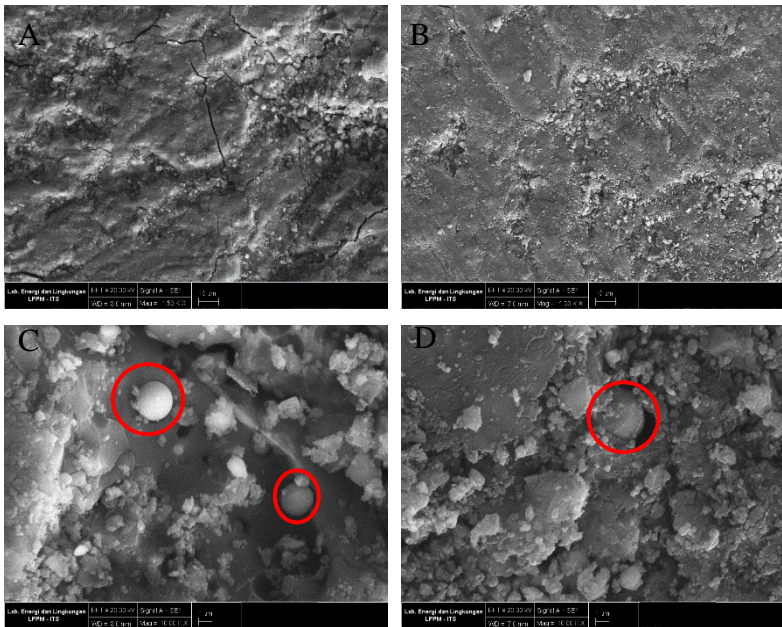
Terjadinya peningkatan intensitas tersebut dihubungkan dengan proses kristalisasi silika. Rattanasak (2009) menjelaskan bahwa kandungan berlebih dari NaOH dalam pasta geopolimer akan menyebabkan penurunan kelarutan Si dan Al akibat meningkatnya koagulasi silika. Kenaikan intensitas tertinggi terdapat pada sampel Geo-E dengan kadar NaOH tertinggi. Sampel Geo-C yang memiliki kuat tekan terbaik menunjukkan penurunan intensitas terendah pada $2\theta=26,67^\circ$. Hal ini menunjukkan pada sampel Geo-C terjadi pelarutan silika dan alumina yang mengalami geopolimerisasi paling optimum pada konsentrasi NaOH sebesar 12 M dengan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 3,33. Penggunaan konsentrasi NaOH dibawah 12 M akan menyebabkan pelarutan yang lebih sedikit dan penggunaan konsentrasi lebih dari 12 M akan menyebabkan kelebihan NaOH yang menghambat proses geopolimerisasi.

4.4 Analisa Morfologi Geopolimer

Analisa morfologi geopolimer dilakukan pada sampel Geo-A (geopolimer dengan kuat tekan terendah) dan sampel Geo-C (geopolimer dengan kuat tekan tertinggi) pada umur 7 hari untuk mengidentifikasi efek larutan pengaktif basa dengan variasi NaOH.

Abu layang pada sampel Geo-A dan Geo-C sebagian besar telah mengalami geopolimerisasi akibat pengaruh larutan pengaktif basa. Namun, secara umum pada kedua sampel tersebut masih terdapat abu layang yang belum bereaksi, yang ditandai dengan

partikel berbentuk bulat. Secara umum, sampel Geo-C memiliki permukaan yang lebih rapat dibandingkan dengan sampel Geo-A. Selain itu, pada sampel C tidak terlihat adanya retakan dan jumlah abu layang yang tidak bereaksi lebih sedikit dibandingkan dengan sampel Geo-A. Pada sampel Geo-A terdapat gumpalan besar yang diperkirakan sebagai partikel yang mengalami aglomerasi (ditandai dengan huruf 'A') (Kutchko dan Kim, 2006).



Gambar 4. 5 Mikrograf SEM geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH A) Permukaan Geo-A, B) Permukaan Geo-C, C) Abu layang yang tidak bereaksi pada Geo-A, D) Permukaan amorf pada Geo-C

Sampel Geo-C memiliki matriks amorf yang lebih halus dibandingkan dengan sampel Geo-A. Matriks geopolimer pada sampel Geo-C lebih homogen dibandingkan dengan matriks geopolimer sampel Geo-A. hal ini berkaitan dengan konsentrasi

NaOH yang lebih tinggi sehingga mampu melarutkan partikel abu layang yang lebih banyak. Pada Geo-A juga terdapat granula kecil pada permukaan abu layang yang tidak bereaksi. Granula ini merupakan reaksi antara abu layang dan larutan pengaktif basa yang belum bereaksi secara sempurna. Hasil mikrostruktur ini berbanding lurus dengan tren data kuat tekan yang dihasilkan, dimana, sampel Geo-C memiliki kuat tekan yang terbaik dibandingkan dengan sampel yang lainnya.

4.5 Analisa pH Geopolimer

Analisa pH geopolimer dilakukan untuk mengetahui pH geopolimer yang dihasilkan. Tes pH dilakukan pada usia 7 hari setelah proses pemeraman geopolimer. Proses tes pH geopolimer dilakukan sesuai ASTM 1067-02. Tes dilakukan dengan pengulangan sebanyak 3 kali. Hasil lengkap analisa pH ditampilkan pada Tabel 4.10.

Berdasarkan Tabel 4.10 Semua sampel geopolimer memiliki rentang pH antara 12,5-13. Hal itu sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Deschner dkk (2012) yang menjelaskan bahwa pH semen portland antar 12,5 – 13. Penambahan konsentrasi NaOH tidak berpengaruh secara signifikan pada pH geopolimer yang dihasilkan. Alasan utama pertambahan pH setelah geopolimer mengeras adalah adanya pelepasan ion OH^- dari NaOH yang diakibatkan karena ion Na^+ digunakan untuk menetralkan muatan pada saat geopolimerisasi berlangsung. Konsentrasi ion OH^- dan pH geopolimer dalam geopolimer akan bertambah dengan pertambahan waktu curing disebabkan karena adanya reaksi hidrasi lanjutan yang melepaskan sejumlah basa (Deschner dkk., 2012).

Tabel 4. 10 pH geopolimer yang dihasilkan

Kode Sampel	pH
Geo-A	12,5
Geo-B	12,6
Geo-C	12,5
Geo-D	12,5
Geo-E	12,6

Nilai pH penting untuk diketahui dalam geopolimer karena berhubungan dengan ketahanan terhadap korosi, karbonasi dan serangan asam. Penurunan nilai pH dapat diindikasikan dengan adanya karbonasi dalam jaringan geopolimer. Hal ini dapat mengurangi nilai pH geopolimer hingga 9. Menurut Zhang dkk. (2014) semakin banyak ion OH^- yang *terleaching*, maka mengindikasikan semakin banyak NaOH berlebih yang berada dalam geopolimer. Ion Na^+ yang berlebih dalam geopolimer kemudian akan bereaksi dengan CO_2 di udara dan membentuk Na_2CO_3 . Fenomena tersebut disebut dengan *efflorescence*, yaitu terbentuknya padatan putih di permukaan geopolimer karena reaksi Na^+ dengan CO_2 di udara.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

Geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI berhasil disintesis dengan variasi konsentrasi larutan pengaktif basa dan rasio S/L. Penambahan konsentrasi NaOH memberikan peningkatan pada kuat tekan geopolimer hingga konsentrasi 12 M, sedangkan melebihi 12 M mengalami penurunan kuat tekan. Geopolimer yang paling optimum dihasilkan dengan konsentrasi NaOH 12 M dan rasio S/L 3,6 dengan memberikan kuat tekan sebesar 48,4 MPa. Geopolimer dengan konsentrasi NaOH 12 M menghasilkan penurunan fase kristalin dan peningkatan fase amorf. Semakin tinggi konsentrasi NaOH maka akan semakin banyak abu layang yang larut. Pada analisa mikrostruktur, masih terdapat abu layang yang tidak bereaksi pada semua sampel geopolimer. Geopolimer dengan konsentrasi NaOH 12 M menghasilkan mikrostruktur yang lebih rapat dan tidak adanya retakan pada geopolimernya. Semua sampel geopolimer memberikan nilai pH diantara 12,5-13.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Anisatun, I., 2014. Amobilisasi Kation Cd^{2+} Pada Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang PT. IPMOMI. Surabaya: Departemen Kimia ITS.
- Antiohos, S. & Tsimas, S., 2007. A Novel Way to Upgrade The Coarse Part of A High Calsium Fly Ash for Reuse Into Cement Systems. *Waste Management*, pp. 675-683.
- Asmuni, 2000. Karakterisasi Pasir Kuarsa (SiO_2) dengan Metode XRD. s.l.:s.n.
- ASTM D 1067-92, 1992. Standard Test Methods for Acidity or Alkalinity of Water. West Conshohocken: ASTM.
- Atmaja, L., Fansuri, H. & Maharani, A., 2011. Crystalline Phase Reactivity In The Synthesis Of Fly Ash-Based. *Indonesia Journal of Chemistry*, 11(1), pp. 90-95.
- Badan Standarisasi Nasional, 2011. Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder (SNI 1974:2011). Dalam: s.l.:Badan Standarisasi Nasional, pp. 1-5.
- Bakharev, T., 2005. Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. *Cem. and Conc. Res.*, 36(6), pp. 1224-1232.
- Balczar, I., Korim, T. & Dobradi, A., 2015. Correlation of Strength to Apparent Porosity of Geopolymers – Understanding Through Variations of Setting Time. *Construction Building and Material*, Volume 93, pp. 983-988.
- Bankowski, P., Zou, L. & Hodges, R., 2004. Reduction of Metal Leaching in Brown Coal Fly Ash Using

- Geopolymers.. Journal Hazardous Material, pp. 59-67.
- Brindle, J. H. & McCarthy, M. J., 2006. Chemical Constraints on Fly Ash Glass Compositions. Energy Fuels, Volume 6, pp. 2580-2585.
- 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.
- Cheng, H, Lin, K., Cui, R., Hwang, C., Cheng, T., Chang, Y., 2015. Effect of Solid-to-Liquid Ratios on The Properties of Waste Catalyst-Metakaolin Based Geopolymer. Constructions Building Material, Volume 88, pp. 74-83.
- Chindaprasirt, T., Chareerat, V. & Sirivivatnanon, V., 2007. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. Cement Construction and Composites, Volume 29, pp. 224-229.
- Cioffi, R., Maffuci, L. & Santoro, L., 2003. Optimization of Geopolymer Synthesis by Calcination and Polycondensation of Kaolinitic Residue, Resource, Conservation and Recycling. Volume 40, pp. 27-38.
- Davidovits, J., 1991. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. Journal of Thermal Analysis, 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.

- Deschner, F. , Winnefeld, B., Lothenbach, S., Seufert, P., Schwesig, S., Dittrich, S., Goetz-Neunhoeffler, F., Neubauer, J., 2012. Hydration of Portland Cement with High Replacement by Siliceous Fly Ash. *Cement Concrete research*, Volume 42, pp. 1389-1400.
- Duxson, P., 2005. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloid Surf, A.:Physicochem*, Volume 269, pp. 47-58.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J., Lukey, G. C., Palomo, A., Van Deventer, J. S. J., 2007. Geopolymer Technology: The Current State of The Art. *J. Mater. Sci.*, 42(9), pp. 2917-2933.
- 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'. *Cem. Conc. Res. Concrete Res.*, Volume 37, pp. 1590-1597.
- Fansuri, H., Anisatun, I., Fatmawati, A., Utomo, W. P., Supriadi, W., Bayuaji, R., Subaer, 2015. Cd²⁺ and Cr³⁺ Cation Immobilization by Using Geopolymer Based on PT. IPMOMI Fly Ash. *Materials Science Forum*, Volume 841, pp. 186-192.
- Fansuri, H., Prasetyoko, D., Zhang, Z. & Zhang, D., 2010. The effect of sodium silicate and sodium hydroxide on the strength of aggregates made from coal fly ash using the geopolymerization method. *asia pacific journal of chemical engineering*, Volume 7, pp. 73-79.

- Fansuri, H., Swastika, N. & Atmaja, L., 2008. Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton. 3(2), pp. 61-66.
- Fansuri, H., Swastika, N. & Atmaja, L., 2008. Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton. Akta Kimindo, pp. 61-66.
- Feldmann, G. C., 2008. Non-destructive testing of reinforced concrete., *Struct. mag.*, pp. 13-17.
- Fernandez-Jimenez, A., Macphee, D. E. & Lachowski, 2005. Immobilization of cesium in alkaline activated fly ash matrix. *Journal Nuclear . Material*, Volume 346, pp. 185-193.
- Hadi, M. N. S., Al-Izzawi, M. & Yu, T., 2018. Effect of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar. *construction and building materials*, Volume 175, pp. 41-54.
- Hamidi, R. M., Man, Z. & Azizli, K. A., 2016. Concentration of naoh and the effect on the properties of fly ash based geopolymer. *Procedia Engineering*, Volume 148, pp. 189-193.
- Hardjito, D. & Rangan, B. V., 2005. *Development and Properties of Low-calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Perth: Faculty of engineering, Curtin University of Technology.
- Khale, D. & Chaudhary, R., 2007. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *J. Mater. Science*, pp. 729-746.

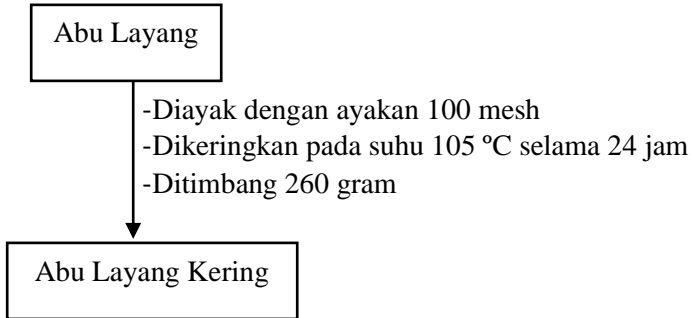
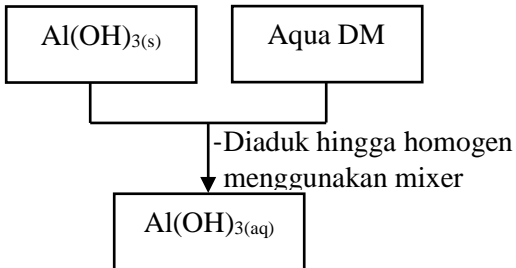
- Komljenovic, M., 2015. Mechanical strength and Young's modulus of alkali-activated cement-based binders. woodhead publishing.
- Komljenovic, M., Bascarevic, Z. & Bradic, V., 2010. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal. Hazardous. Material.*
- Komnitsas, K. A., 2011. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Proc. Eng, Volume 21*, pp. 1023-1032.
- Komnitsas, K. & Zaharaki, D., 2007. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry.. *Mineral Eng., Volume 20*, pp. 1261-1277.
- Kroschwitz, J., 1990. *Polymer Characterization And Analysis.*
- Kumar, S., Kristaly, F. & Mucsi, G., 2015. Geopolymerisation behaviour of size fractioned fly ash,. *Adv. Powder Technol, 26(1)*, pp. 24-30.
- Kutchko, B. G. & Kim, A. G., 2006. Fly Ash Characterization by SEM-EDS. *fuel, Volume 85*, pp. 2537-2544.
- Lee, W. K. W. & van Deventer, J. S. J., 2002. The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloid. Surf. A. , pp. 27-44.*
- Manuahe, R., Sumajouw, M. D. & Windah, R. S., 2014. Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash). pp. 277-282.

- McPolin, D. O., Basheer, P. A. M. & Long, A., 2009. Carbonation and pH in mortars manufactured with supplementary cementitious materials. *J. Mater. Civ. eng.*, Volume 21, pp. 217-225.
- Neville, A. M., 1996. *Properties of Concrete*. 4 penyunt. UK: Esscx.
- Nicolas, R. V. R. S., Walkley, B. & van Deventer, J. S. J., 2017. *Fly Ash-Based Geopolymer Chemistry and behavior*.
- Nugraha, S., 2017. *Dewan Energi Nasional: outlook energi indonesia 2016*. Jakarta: kementerian energi dan sumber daya mineral republik indonesia.
- Nurkholifah, R., 2019. *Sintesis geopolimer berbasis abu layang Abu Layang PT. IPMOMI dengan variasi sumber waterglass*. Skripsi Program Sarjana penyunt. Surabaya: Departemen Kimia FSAINS ITS.
- Provis, J. L. & van Deventer, J. S. J., 2009. *Geopolymer: structure, Processing, Properties and Industrial Application*, Abingdon, woodhead Publishing.
- Rahier, H., 2007. Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers. *J. Mater. Sci*, Volume 42, pp. 2982-2996.
- Rattanasak, U. & Chindaprasit, P., 2008. Influence Of NaOH Solution On The Synthesis of Fly Ash Geopolymer. *Mineral Engineering*, Volume 22, pp. 1073-1078.
- Singh, B. G. I., Gupta, M. & Bhattacharyya, S. K., 2015. Geopolymer concrete: A review of some recent development. *Construction and building materials*, Volume 85, pp. 78-90.

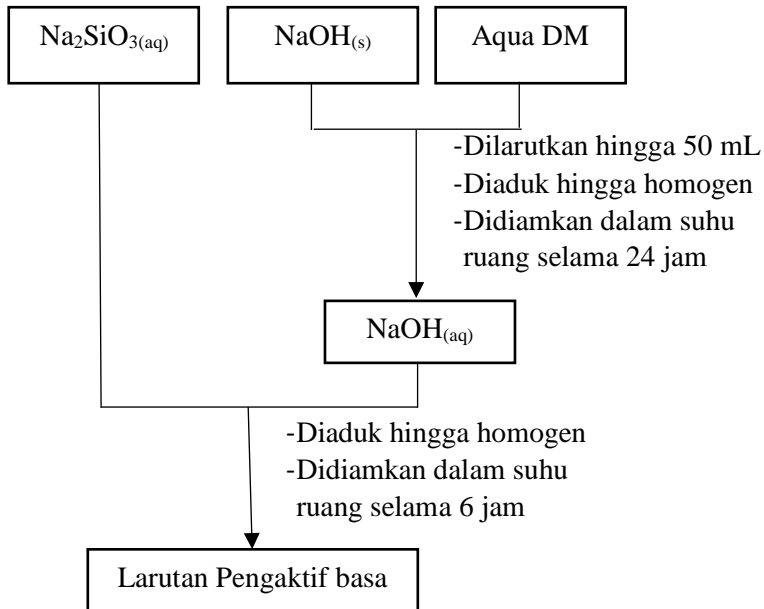
- Soutsos, M., Boyle, A. P., Vinai, R., Hadjierakleous, A., Barnett, S. J., 2016. Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. *Constr. Build. Mater.*, Volume 110, pp. 355-368.
- Supriadi, W., 2017. Amobilisasi Kation-Kation Logam Berat Menggunakan Geopolimer dari Abu layang. Disertasi Program Doktor penyunt. Surabaya: Departemen Kimia Fsains ITS.
- van Jaarsveld, J., van Deventer, J. & Lukey, G., 2003. the characterisation of source materials in fly ash-based geopolymer. *Materials Letter*, pp. 1272-1280.
- Wu, H. W., Rossiter, A., Zhu, J. N. & Zhang, D. K., 2005. An economic analysis of manufacturing aggregates from coal ash: an Australian scenario. *ICCS&T*, Okinawa.
- Xiao, Y., Liang, C., Komarmeni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., Wang, H., 2016. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *J. Cleaner Product*, Volume 125, pp. 253-267.
- Xu, H. & van Deventer, J. S. J., 2000. The geopolymerization of alumino-silicate minerals. *international journal of mineral processing*, 59(3), pp. 247-266.
- 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.
- Zhang, Z. , Provis, J. I., Ma, X., Reid, A., Wang, H., Supriadi, 2018. Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers. pp. 165-177.

- Zheng, L., Wang, W. & Shi, Y., 2010. The effect of alkaline dosage and Si/Al ratio on the immobilization of heavy metal in municipal solid waste incineration fly ash-b geopolymersed. *Chemosphere*, Volume 79, pp. 665-671.
- Zuhua, Z., 2009. Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Appl Clay Sci*, Volume 43, pp. 218-213.

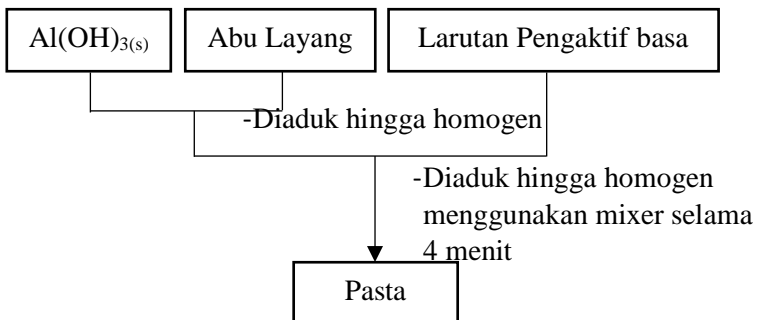
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

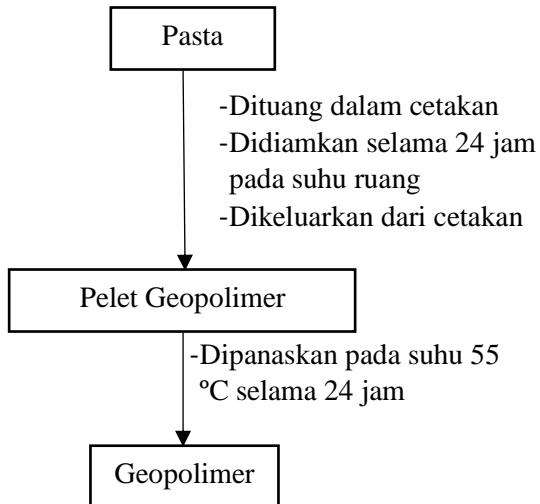
LAMPIRAN**Lampiran A: SKEMA KERJA****A1. Preparasi Abu Layang****A2. Pembuatan larutan Al(OH)_3** 

A3. Pembuatan larutan pengaktif basa

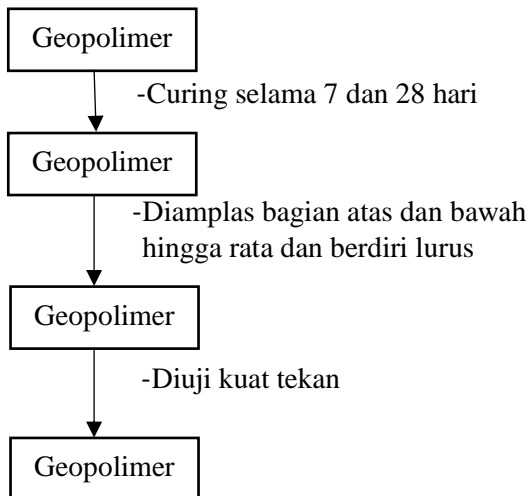


A4. Sintesis Geopolimer

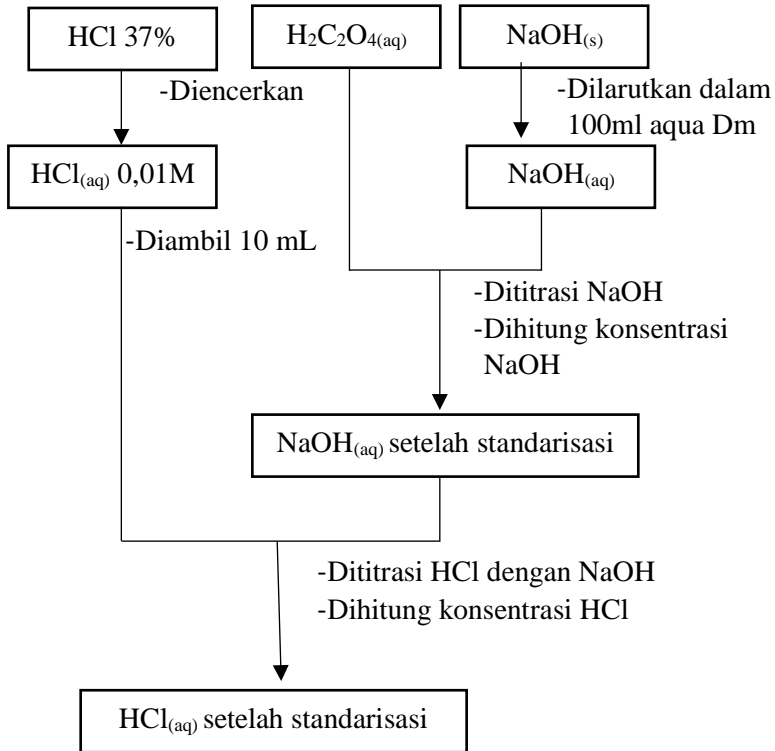




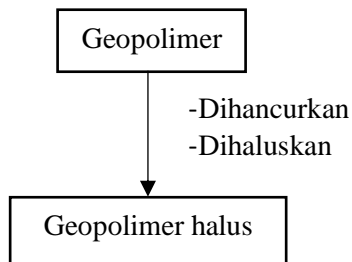
A5. Uji Kuat Tekan Geopolimer

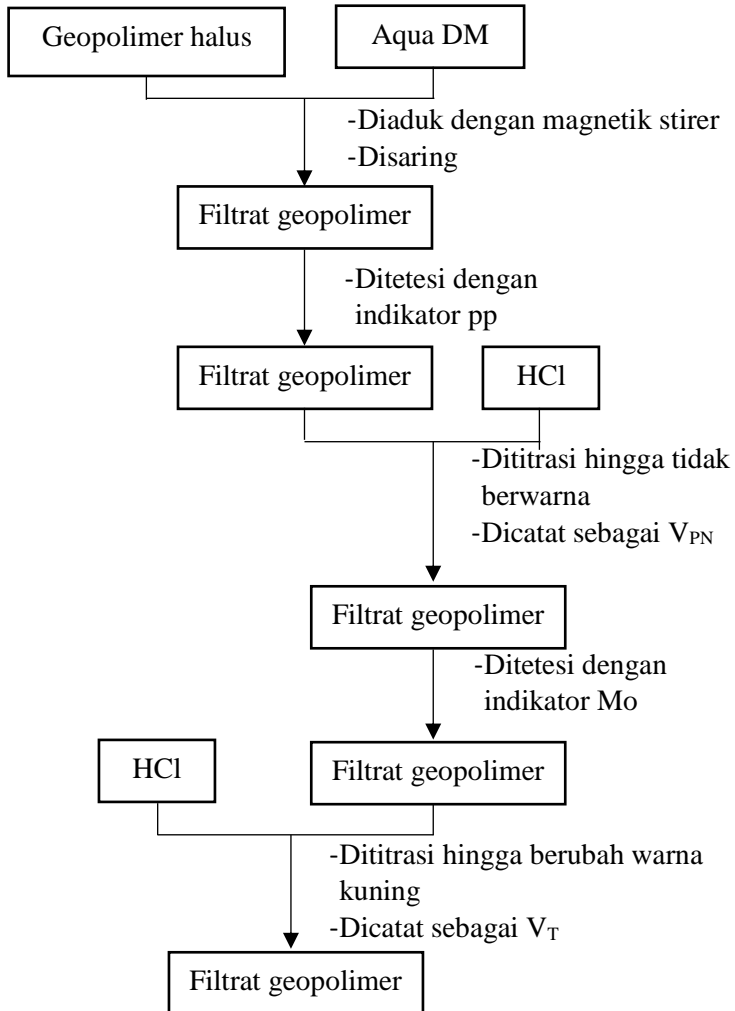


A6. Standarisasi HCl



A7. Pengukuran pH Geopolimer





Lampiran B: Perhitungan Sintesis Geopolimer

B1. Kandungan Abu Layang dan Waterglass

Kandungan	Abu Layang (%)	Waterglass (%)
SiO ₂	50,67	28,69
Al ₂ O ₃	13,76	0
Na ₂ O	0,19	19,35
H ₂ O	0	28,94
Persentase solid	100	71,06

B2. Kandungan NaOH dan Al(OH)₃

Kandungan	Mr (gr/mol)	NaOH (%)	Al(OH) ₃ (%)
Na ⁺	27	56,92	0
Al ³⁺	23	0	34,27
H ₂ O	18	1	1
Persentase solid		99	99

Kandungan Na⁺ dalam NaOH dianggap sebagai Na₂O

Kandungan Al³⁺ dalam Al(OH)₃ dianggap sebagai Al₂O₃, dengan setiap 2 kali Al³⁺ sama dengan 1 kali Al₂O₃

B3. Kandungan Na₂O dan H₂O yang dibutuhkan

Kandungan	Geo-A (mol)	Geo-B (mol)	Geo-C (mol)	Geo-D (mol)	Geo-E (mol)
Na ₂ O	0,247	0,272	0,297	0,321	0,34
H ₂ O	4,735	4,736	4,737	4,738	4,74

B4. Perhitungan Rasio S/L

- Fase Solid (S) adalah semua bahan yang memiliki kandungan berfasa solid (abu layang, *waterglass*, NaOH dan Al(OH)₃)
- Fase liquid adalah semua baha yang memiliki kandungan berfasa liquid (aqua DM, *waterglass*, NaOH dan Al(OH)₃)

Rasio S/L	Abu layang	NaOH	Al(OH) ₃	Water glass	Aqua DM
3,1	260 g	24 g	3,4 g	80 g	87,53 g
3,6	260 g	24 g	3,4 g	80 g	72,12 g
4,1	260 g	24 g	3,4 g	80 g	60,47 g
4,6	260 g	24 g	3,4 g	80 g	51,35 g

Sehingga untuk menghitung rasio S/L geopolimer sebagai berikut:

Rasio S/L

$$\begin{aligned}
 & \text{FA} + (\text{WG} \times 71,06\%) + (\text{Al(OH)}_3 \times 99\%) + (\text{NaOH} \times 99\%) \\
 &= \frac{\text{WG} \times 28,94\% + ((\text{Al(OH)}_3 \times 1\%) + (\text{NaOH} \times 1\%) + \text{Aqua DM}}{260 + (80 \times 71,06\%) + (3,4 \times 99\%) + (24 \times 99\%)} \\
 &= \frac{(80 \times 28,94\%) + (3,4 \times 1\%) + (24 \times 1\%) + 72,12}{260 + (80 \times 71,06\%) + (3,4 \times 99\%) + (24 \times 99\%)} \\
 &= 3,6
 \end{aligned}$$

B5. Perhitungan Rasio Jumlah Mol

bahan	berat (g)	SiO ₂ (mol)	Al ₂ O ₃ (mol)	Na ₂ O (mol)	H ₂ O (mol)	total Na ₂ O	total H ₂ O
FA	260	2,196	0,357	0,008			
WG	80	0,383		0,249	1,286		
Al(OH) ₃	3,4		0,022		0,002		
NaOH 1	20			0,248	0,011	0,51	4,76
NaOH 2	22			0,272	0,012	0,53	4,76
NaOH 3	24			0,297	0,013	0,55	4,76
NaOH 4	26			0,322	0,014	0,58	4,76
NaOH 5	28			0,346	0,016	0,60	4,76
H ₂ O	61,85				3,436		
Total		2,578	0,379				

Kode	Geo-A	Geo-B	Geo-C	Geo-D	Geo-E
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	6,79	6,796	6,796	6,796	6,796
Na ₂ O/SiO ₂	0,196	0,205	0,215	0,224	0,234
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	1,332	1,396	1,462	1,527	1,592
H ₂ O/Na ₂ O	9,374	8,938	8,541	8,179	7,845

Lampiran C: Perhitungan kuat tekan geopolimer

Data yang diperoleh dari pengujian kuat tekan adalah gaya yang dapat ditanggung oleh geopolimer dalam satuan kiloNewton (kN). Data tersebut kemudian diolah menjadi data kuat tekan dengan satuan Mega pascal (MPa) dengan rumus:

$$f'c = \frac{P}{A} = \frac{\text{Gaya (kN)}}{\pi r^2} = \frac{\text{gaya yang tertera dalam alat uji (kN)}}{\text{luas permukaan sentuh benda uji (m}^2\text{)}}$$

Dimana jari-jari geopolimer (r) adalah 1 m dan $\pi = 3,14$

C1. Kuat tekan geopolimer variasi NaOH 7 hari

kode	kN/m ²	MPa
Geo-A	12	38,22
	12	38,22
	10	31,85
	10	31,85
	13	41,40
Rata-rata	11,4	36,30

kode	kN/m ²	MPa
Geo-B	12	38,22
	13	41,40
	13	41,40
	16	50,96
	14	44,58
Rata-rata	13,6	43,31

kode	kN/m ²	MPa
Geo-C	11	35,03
	19	60,51
	14	44,58
	17	54,14
	15	47,77
Rata-rata	15,2	48,41

kode	kN/m ²	MPa
Geo-D	13	41,40
	14	44,58
	12	38,22
	11	35,03
	12	38,22
Rata-rata	12,4	39,49

kode	kN/m ²	MPa
E	10	31,85
	13	41,40
	16	50,96
	10	31,85
	13	41,40
Rata-rata	12,4	39,49

C2. Kuat tekan geopolimer variasi NaOH 28 hari

kode	kN/m ²	MPa
GeoA-28	12	38,22
	16	50,96
	9	28,66
	10	31,85
	13	41,40
Rata-rata	12	38,22

kode	kN/m ²	MPa
GeoB-28	19	60,51
	15	47,77
	14	44,58
	16	50,96
	21	66,88
Rata-rata	17	54,14

kode	kN/m ²	MPa
GeoC-28	17	54,14
	15	47,77
	18	57,32
	17	54,14
	19	60,51
Rata-rata	17,2	54,77

kode	kN/m ²	MPa
GeoD-28	14	44,58
	13	41,40
	11	35,03
	15	47,77
	13	41,40
Rata-rata	13,2	42,04

kode	kN/m ²	MPa
GeoE-28	13	41,40
	14	44,58
	19	60,51
	18	57,32
	18	57,32
	16,4	52,22

C3. Kuat tekan geopolimer variasi rasio S/L 7 hari

kode	kN/m ²	MPa
GeoSL-A	15	47,77
	18	57,32
	13	41,40
	12	38,22
	11	35,03
Rata-rata	13,8	43,95

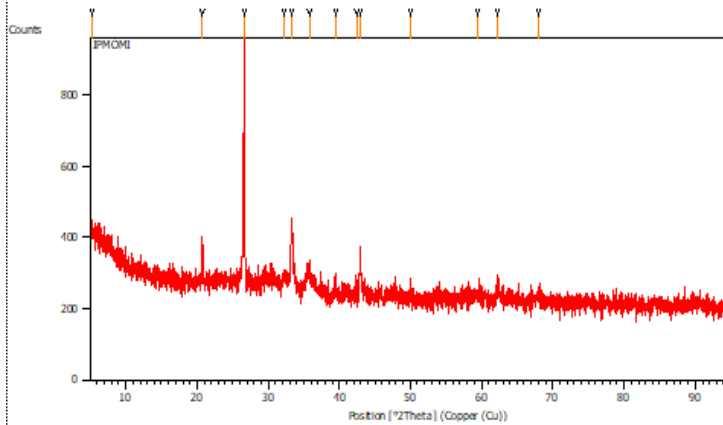
kode	kN/m ²	MPa
GeoSL-B	13	41,40
	12	38,22
	16	50,96
	18	57,32
	11	35,03
Rata-rata	14	44,59

kode	kN/m ²	MPa
GeoSL-C	11	35,03
	13	41,40
	15	47,77
	14	44,59
	13	41,40
Rata-rata	13,2	42,04

kode	kN/m ²	MPa
GeoSL-D	13	41,40
	11	35,03
	10	31,85
	11	35,03
	13	41,40
Rata-rata	11,6	36,94

Lampiran D Data karakterisasi XRD

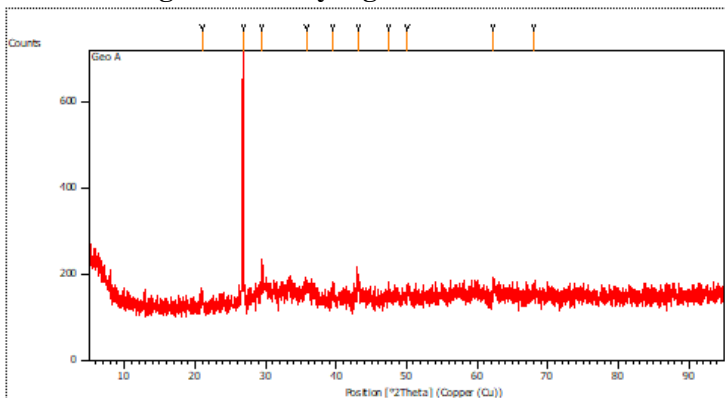
D1. Difraktogram Abu layang PT. IPMOMI



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.2568	35.91	0.4015	16.81128	5.38
Q20.7842	86.54	0.1673	4.27388	12.97
Q 26.6017	667.07	0.1338	3.35096	100.00
Mh 32.2319	34.64	0.4015	2.77733	5.19
M 33.2860	170.89	0.1338	2.69175	25.62
H 35.7373	54.64	0.4684	2.51254	8.19
M 39.4767	29.62	0.3011	2.28274	4.44
M 42.3609	33.27	0.2007	2.13375	4.99
M 42.8457	120.47	0.1338	2.11072	18.06
H 50.0285	36.45	0.4015	1.82322	5.46
59.5294	17.86	0.8029	1.55293	2.68
M 62.3262	36.32	0.2676	1.48980	5.44
68.1043	26.51	0.5353	1.37680	3.97

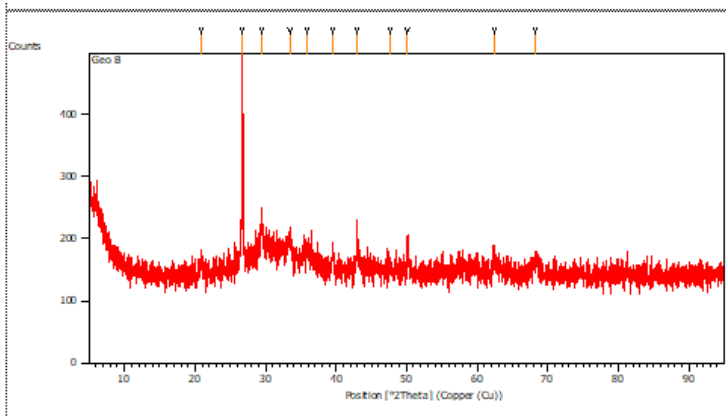
D2. Difraktogram Abu layang Geo-A



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21.0045	28.49	0.2676	4.22956	4.88
26.7535	584.17	0.0669	3.33230	100.00
29.5208	67.15	0.1673	3.02592	11.49
35.7406	29.80	0.5353	2.51232	5.10
39.5030	23.82	0.4015	2.28127	4.08
43.0401	52.40	0.3346	2.10164	8.97
47.5450	24.11	0.2342	1.91249	4.13
50.1388	15.68	0.8029	1.81947	2.68
62.3502	33.39	0.2007	1.48929	5.72
68.0953	15.83	0.8029	1.37696	2.71

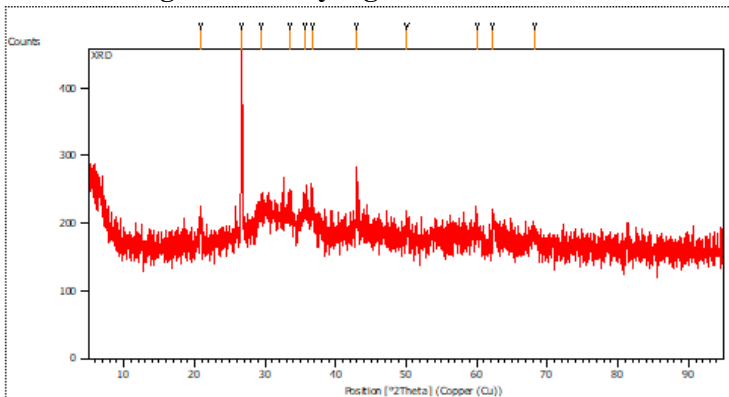
D3. Difraktogram Abu layang Geo-B



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.8656	31.45	0.2007	4.25739	10.50
26.6346	299.45	0.0816	3.34413	100.00
26.7280	279.30	0.0669	3.33542	93.27
29.4330	62.63	0.2007	3.03475	20.92
33.4112	35.56	0.4015	2.68195	11.87
35.8517	24.61	0.8029	2.50478	8.22
39.4751	32.21	0.2676	2.28282	10.76
42.9550	63.32	0.1171	2.10560	21.15
47.6293	12.52	0.6691	1.90930	4.18
50.1620	53.71	0.1004	1.81868	17.94
62.3677	27.80	0.2676	1.48891	9.28
68.2326	16.03	0.9368	1.37453	5.35

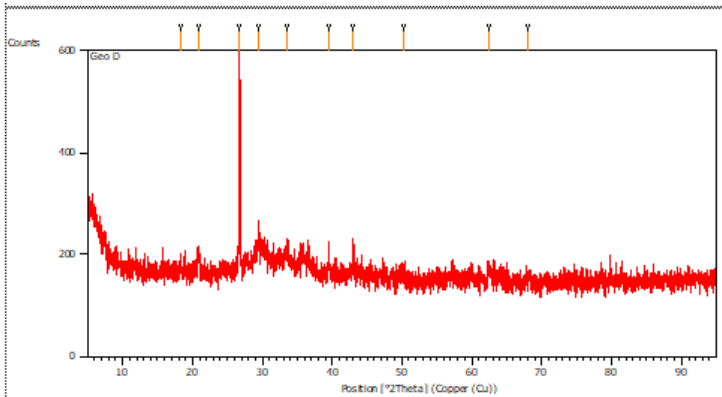
D4. Difraktogram Abu layang Geo-C



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.9293	57.58	0.1338	4.24457	23.83
26.6362	241.60	0.1004	3.34671	100.00
29.4199	25.97	0.8029	3.03607	10.75
33.4820	20.65	0.8029	2.67644	8.55
35.6182	30.32	0.5353	2.52067	12.55
36.6399	33.69	0.4015	2.45269	13.94
43.0153	79.57	0.2007	2.10279	32.93
50.1714	25.04	0.4015	1.81836	10.36
60.0645	28.86	0.2676	1.54037	11.95
62.3485	36.77	0.3346	1.48932	15.22
68.2767	18.24	0.9368	1.37375	7.55

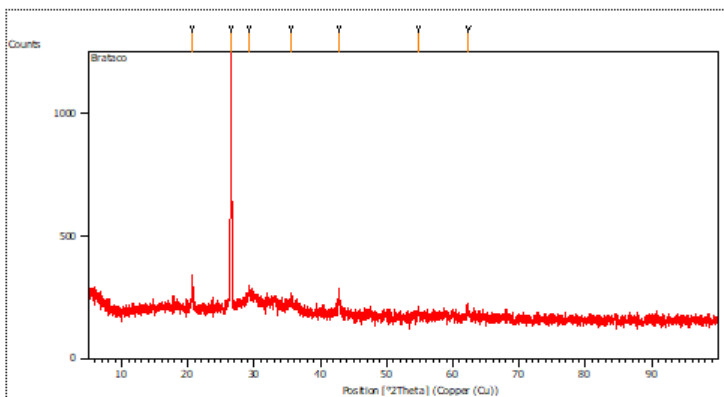
D5. Difraktogram Abu layang Geo-D



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
18.3602	30.50	0.1673	4.83230	7.51
20.8781	43.64	0.2007	4.25486	10.74
26.7220	406.34	0.1338	3.33616	100.00
29.4642	61.66	0.2007	3.03160	15.17
33.5333	29.55	0.4015	2.67246	7.27
39.4987	26.38	0.4015	2.28151	6.49
42.9694	73.55	0.1673	2.10493	18.10
50.2361	15.46	0.8029	1.81617	3.81
62.4036	30.58	0.2676	1.48810	7.53
68.1026	13.36	0.5553	1.37683	3.29

D6. Difraktogram Abu layang Geo-E



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.6699	94.21	0.1338	4.29726	9.01
26.5177	1045.71	0.0502	3.36139	100.00
29.1717	43.15	0.4015	3.06133	4.13
35.4916	30.04	0.4015	2.52937	2.87
42.7302	73.88	0.2007	2.11616	7.06
54.7286	31.52	0.2007	1.67724	3.01
62.3622	32.07	0.4015	1.48903	3.07

Lampiran E. Penentuan pH geopolimer

E1. Pembuatan larutan NaOH 0,1 M

$$M_r \text{ NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$M \text{ NaOH} = \frac{n \text{ NaOH}}{V}$$

$$0,1 \text{ M NaOH} = \frac{n \text{ NaOH}}{0,1 \text{ L}}$$

$$n \text{ NaOH} = 0,01 \text{ mol}$$

$$n \text{ NaOH} = \frac{\text{massa NaOH}}{M_r}$$

$$0,01 \text{ NaOH} = \frac{\text{massa NaOH}}{40}$$

$$\text{Massa NaOH} = 0,4 \text{ g}$$

E2. Standarisasi NaOH 0,1 M dengan H₂C₂O₄ 0,1 N

Standarisasi NaOH	V As Oksalat	C NaOH
v1	5,1	0,102
v2	4,9	0,098
v3	4,9	0,098
	C NaOH rata	0,099

Perhitungan standarisasi NaOH dihitung menggunakan rumus

$$M \text{ NaOH} \times V \text{ NaOH} \times \text{valensi} = M \text{ As Oksalat} \times V \text{ as oksalat} \times \text{valensi}$$

$$M \text{ NaOH} \times 10 \text{ mL} \times 1 = 0,1 \text{ M} \times 5,1 \text{ mL} \times 2$$

$$M \text{ NaOH} = 0,102 \text{ N}$$

E3. Standarisasi larutan HCl 0,1 N dengan NaOH 0,1 N

standarisasi HCl	V NaOH	CHCl
v1	1,2	0,012
v2	1,1	0,011
v3	1,1	0,011
	CHCl rata	0,011

Perhitungan standarisasi HCl dihitung menggunakan rumus

$$M \text{ HCl} \times V \text{ HCl} \times \text{valensi} = M \text{ NaOH} \times V \text{ NaOH} \times \text{valensi}$$

$$M \text{ HCl} \times 10 \text{ mL} \times 1 = 0,1 \text{ M} \times 1,2 \text{ mL} \times 1$$

$$M \text{ NaOH} = 0,012 \text{ N}$$

E4. Perhitungan pH geopolimer

kode	VPN	VT	konsentrasi	pOH	pH	ph rata
A1	22,3	10,5	0,038	1,415	12,585	12,512
A2	17,4	8,9	0,029	1,535	12,465	
A3	17,4	7,6	0,031	1,514	12,486	
B1	29,1	8,9	0,056	1,255	12,745	12,646
B2	22,1	11,2	0,037	1,430	12,570	
B3	25	12,8	0,042	1,378	12,622	
C1	23,4	12,4	0,039	1,412	12,588	12,388
C2	16,1	14,9	0,019	1,710	12,290	
C3	16	14,9	0,019	1,715	12,285	
D1	25	9,3	0,046	1,339	12,661	12,489
D2	18,7	15	0,025	1,598	12,402	
D3	18,7	14,9	0,025	1,596	12,404	
E1	31,1	10,4	0,058	1,234	12,766	12,672
E2	24,8	11,8	0,043	1,371	12,629	
E3	24,8	12,5	0,042	1,379	12,621	

Sehingga perhitungan pH geopolimer dihitung dengan persamaan:

$$[\text{OH}^-] = \frac{0,01 (2 \times V_{\text{PN}} - V_{\text{T}})}{V_0}$$

$$[\text{OH}^-] = \frac{0,01 (2 \times 22,3 \text{ mL} - 10,5 \text{ mL})}{10 \text{ mL}}$$

$$[\text{OH}^-] = 0,038$$

$$\text{pOH} = -\log 0,038$$

$$\text{pOH} = 1,415$$

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH}$$

$$\text{pH} = 14 - 1,415$$

$$\text{pH} = 12,585$$

Lampiran F. Data karakterisasi Vicat**F.1 Data karakterisasi jarum Vicat**

Rasio S/L	3,1	3,6	4,1	4,6
0 menit	4,2	4,2	4,2	4,2
5 menit	4,2	4,2	4,2	4,2
15 menit	4,2	4,2	4,2	3,1
30 menit	4,2	4,2	3,1	2
45 menit	3	3	1,8	0,3
60 menit	2,6	1,7	0,5	0,1
75 menit	2,1	0,4	0,4	0,1
90 menit	2	0,4	0,4	>0,1

Biodata Penulis



Penulis bernama Bagus Akbar Affebriansyah yang dilahirkan di Lumajang pada tanggal 15 februari 1997. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis pernah menempuh pendidikan di SDN Yosowilangun Lor 01, SMPN 1 Yosowilangun dan SMAN 1 Lumajang. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Kimia Fakultas Sains, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) melalui jalur SBMPTN pada tahun 2015 dan terdaftar sebagai mahasiswa Kimia ITS dengan NRP 01211540000065. Penulis pernah melakukan kerja praktik di Laboratorium Mikroorganisme PT. Mitra Tani Dua Tujuh Jember. Penulis menyelesaikan pendidikannya di Departemen Kimia FS ITS dengan mengambil tugas akhir yang berjudul “Optimalisasi Komposisi Geopolimer Berbasis Abu Layang PT. IPMOMI dengan Variasi Konsentrasi NaOH dan Rasio S/L” yang dibimbing oleh Bapak Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D dan Ir. Endang Purwanti S., M.T. penulis dapat diajak berdiskusi mengenai tugas akhir maupun topik lainnya dan dapat dihubungi melalui email: bgsaffebriansyah@gmail.com