



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

SKRIPSI

**GEPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU LAYANG
DARI EMPAT PLTU: HOLCIM, PAITON 1-2,
KETAPANG DAN WILMAR**

**FITRIA SANDI FARADILLA
NRP. 012 1 15 4000 0045**

**Dosen Pembimbing
Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D**

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

SCRIPT

**FLY ASH BASED GEOPOLYMERS FROM FOUR
PLTU: HOLCIM, PAITON 1-2, KETAPANG
AND WILMAR**

**FITRIA SANDI FARADILLA
NRP. 012 1 15 4000 0045**

**Supervisor:
Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D**

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

**GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU LAYANG DARI
EMPAT PLTU: HOLCIM, PAITON 1-2, KETAPANG DAN
WILMAR**

SKRIPSI

Disusun untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Program Studi S-1
Departemen Kimia
Fakultas Sains
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Oleh :

**FITRIA SANDI FARADILLA
NRP. 012 115 40 000 045**

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

LEMBAR PENGESAHAN

**GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU LAYANG DARI
EMPAT PLTU: HOLCIM, PAITON 1-2, KETAPANG DAN
WILMAR**

SKRIPSI

Oleh:

FITRIA SANDI FARADILLA

NRP. 012 1 15 4000 0045

Surabaya, 2 Juli 2019

Dosen Pembimbing



Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D

NIP. 19691017 199412 1 001

Dosen Pembimbing,

**Mengetahui,
Kepala Departemen Kimia**



Prof. Dr. Didik Prasetyoko, M.Sc.

NIP. 19710616 199703 1 002

GEPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU LAYANG DARI EMPAT PLTU: HOLCIM, PAITON 1-2, KETAPANG DAN WILMAR

Nama : Fitriya Sandi Faradilla
NRP : 0121154000045
Departemen : Kimia
Pembimbing 1 : Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D

ABSTRAK

Abu layang merupakan limbah industri yang paling banyak dihasilkan oleh pembangkit listrik berbahan bakar batu bara. Penggunaan abu layang pada teknologi geopolimer merupakan solusi alternatif untuk mengurangi dampak negatif dari limbah industri. Pada penelitian ini disintesis geopolimer berbahan dasar abu layang dari berbagai sumber diantaranya, PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang, dan Wilmar. Sintesis geopolimer dilakukan dengan dua metode yaitu metode non impregnasi dan impregnasi, perbedaan metode tersebut berpengaruh pada *setting time*, dimana metode impregnasi memberikan *setting time* yang lebih cepat. Sebelum digunakan abu layang diuji beberapa karakteristiknya menggunakan instrumen XRD, XRF, ICP, SEM dan PSA. Pada sintesis ini dilakukan variasi waktu geopolimerisasi yaitu 7, 14, dan 28 hari. Hanya terdapat dua sumber abu layang yang berhasil disintesis menjadi geopolimer yaitu abu layang PLTU Holcim dan Paiton 1-2. Hasil uji kekuatan tekan tertinggi diperoleh geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Holcim dengan nilai kuat tekan sebesar 36,6 Mpa. Selain itu dilakukan juga uji pH terhadap geopolimer, hasil uji tersebut menunjukkan bahwa geopolimer berada pada rentang pH sebesar 12,17-12,88.

Kata Kunci: Abu layang, Geopolimer, Kuat tekan, *Setting time*, *pH*

FLY ASH BASED GEOPOLYMER FROM FOUR PLTU: HOLCIM, PAITON 1-2, KETAPANG DAN WILMAR

Name : **Fitria Sandi Faradilla**
NRP : **0121154000045**
Department : **Chemistry**
Advisor Lecturer 1 : **Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D**

ABSTRACT

Fly ash is the most industrial waste produced by coal-fired power plants. The use of fly ash in geopolymer technology is an alternative solution to reduce the negative impact of industrial waste. In this study, geopolymers based on fly ash were synthesized from various sources including Holcim PLTU, Paiton 1-2, Ketapang, and Wilmar. Geopolymer synthesis was carried out with two methods, namely the non impregnation and impregnation method, the difference in the method affected the setting time, where the impregnation method provided a faster setting time. Before being used fly ash was characterized using XRD, XRF, ICP, SEM and PSA instruments. In this synthesis, geopolymerization time variations are 7, 14 and 28 days. There are only two sources of fly ash which were successfully synthesized into geopolymers, namely fly ash from Holcim and Paiton PLTU 1-2. The highest compressive strength test results obtained geopolymers based on fly ash Holcim PLTU with compressive strength of 36.6 Mpa. In addition, a pH test on geopolymers was also carried out, the test results showed that geopolymers were in the pH range of 12.17-12.88.

Keywords: Fly Ash, Geopolymer, Compressive Streght, Setting Time, pH

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas izin, pertolongan, dan kehendak-Nya, tugas akhir dengan judul “GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU LAYANG DARI EMPAT PLTU: HOLCIM, PAITON 1-2, KETAPANG DAN WILMAR” dapat diselesaikan dengan baik. Tugas akhir ini dibuat sebagai syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana di Departemen Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam penyusunan dan penyelesaian tugas akhir ini, penulis menghadapi banyak kendala. Akan tetapi, penulis mendapatkan banyak dukungan dan bantuan dari banyak pihak yang membantu secara langsung maupun tidak langsung. Karena itu, penulis mengucapkan terima kasih dengan segala ketulusan dan kerendahan hati kepada:

1. Bapak Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D. selaku dosen yang telah memberikan pengarahan selama pengerjaan penelitian geopolimer.
2. Bapak Prof. Dr. Didik Prasetyoko, M.Sc, selaku Kepala Departemen Kimia atas fasilitas yang telah diberikan hingga naskah Skripsi ini dapat terselesaikan.
3. Ibu Dra. Ita Ulfin, M.Si. selaku dosen wali yang telah membimbing selama saya kuliah di Kimia ITS.
4. Bapak Dr. Djoko Hartanto, M.Si, selaku kepala Laboratorium Kimia Material dan Energi yang telah memberikan fasilitas selama pengerjaan tugas akhir.
5. Dosen-dosen Departemen Kimia ITS atas ilmu dan bimbingannya yang diberikan selama penulis belajar di ITS
6. Kedua orang tua dan keluarga besar saya yang selalu memberi dukungan, doa, serta semangat yang tiada henti.
7. Teman-teman mahasiswa Kimia FIA ITS angkatan 2015 beserta rekan-rekan seperjuangan di Laboratorium KME atas semua bantuan, semangat, doa dan dukungannya
8. Virezo Georgian sebagai partner dan penyemangat dalam penyelesaian tugas akhir ini

9. Aisya, Anindika, dan Viklol atas bantuan selama penyelesaian tugas akhir ini
10. Teman-teman Goldschmidt Kimia 2015 atas solidaritas dan kekeluargaan dalam suka maupun duka
11. Semua pihak yang membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa di dalam tugas akhir ini masih banyak terdapat kekurangan karena keterbatasan kemampuan, pengetahuan, dan pengalaman yang penulis miliki. Oleh karena itu, penulis memohon maaf dan juga mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun terhadap tugas akhir ini.

Akhir kata, penulis berharap agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan pengetahuan bagi para pembaca.

Surabaya, 29 Mei 2019

Fitria Sandi Faradilla

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Geopolimer	5
2.2 Reaksi Geopolimerisasi	7
2.3 Abu layang	9
2.4 Larutan pengaktif basa	10
2.4.1 Natrium Hidroksida (NaOH)	10
2.4.2 Natrium Silikat (Na ₂ SiO ₃)	11
2.5 X-Ray Diffraction (XRD)	11
2.6 Scanning Electron Microscope (SEM)	13
2.7 Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP)	15
2.8 Particle Size Analyzer (PSA)	16
2.9 XRF	17
2.10 Kekuatan Tekan	17
2.11 pH	18
2.12 Impregnasi	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Alat dan Bahan	21
3.1.1 Alat	21
3.1.2 Bahan	21
3.2 Prosedur Kerja	22
3.2.1 Preparasi abu layang	22

3.2.2 Uji Kelarutan Abu Layang	22
3.2.3 Pembuatan Larutan Pengaktif Basa	23
3.2.4 Preparasi Cetakan Geopolimer.....	23
3.2.5 Sintesis Geopolimer.....	23
3.2.6 Pengujian <i>Setting Time</i>	24
3.2.7 Standarisasi HCl.....	25
3.2.8 Pengujian pH	26
3.3 Karakterisasi dan Pengujian	26
3.3.1 Karakterisasi Fasa dan Mineral Abu Layang Menggunakan <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	26
3.3.2 Karakterisasi Morfologi Abu Layang Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	27
3.3.3 Karakterisasi Komposisi Unsur Abu Layang menggunakan <i>X-Ray Fluoresence (XRF)</i>	27
3.3.4 Karakterisasi Kandungan Si dan Al Abu Layang menggunakan <i>Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)</i>	27
3.3.5 Uji Kuat Tekan.....	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Komposisi Fasa Mineral dan Kekristalan	29
4.2 Morfologi Abu Layang	31
4.3 Distribusi Ukuran Partikel.....	35
4.4 Kelarutan Si dan Al	38
4.5 Komposisi Kimia Abu Layang	40
4.6 Sintesis Geopolimer.....	44
4.7 Kekuatan Tekan	51
4.8 Pengujian pH	56
4.9 Pengujian Jarum Vicat	57
BAB V KESIMPULAN	63
DAFTAR PUSTAKA.....	65
LAMPIRAN	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur tiga unit monomer pembentuk geopolimer	6
Gambar 2.2	Struktur geopolimer model Davidoits	7
Gambar 2.3	Reaksi Geopolimerisasi	8
Gambar 2.4	Pantulan sinar-X pada bidang kristal.....	12
Gambar 2.5	Difraktogram sinar-X abu layang PT. IPMOMI .	13
Gambar 2.6	Skema dan cara kerja SEM	14
Gambar 2.7	Dimensi ukuran beton	18
Gambar 4.1	Difraktogram Sinar-X abu layang dari PLTU A). Holcim, B). Paiton 1-2, C). Ketapang, dan D). Wilmar.....	31
Gambar 4.2	Mikrograf abu layang PLTU Holcim	33
Gambar 4.3	Mikrograf abu layang PLTU Paiton 1-2.....	34
Gambar 4.4	Mikrograf abu layang PLTU Ketapang.....	34
Gambar 4.5	Mikrograf abu layang PLTU Wilmar	35
Gambar 4.6	Distribusi ukuran partikel abu layang dari PLTU (A) Holcim, (B) Paiton 1-2, (C) Ketapang, dan (D) Wilmar.....	38
Gambar 4.7	Grafik Hasil Kelarutan Abu Layang PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar	39
Gambar 4.8	Hasil visual abu layang PLTU (A) Holcim, (B) Paiton 1-2, (C) Ketapang, dan (D) Wilmar	46
Gambar 4.9	Proses pencetakan dan pemeraman pasta geopolimer dalam cetakan silinder dengan abu layang (A) Paiton 1-2, (B) Holcim	47
Gambar 4.10	Foto Geopolimer dari abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan metode non-impregnasi (langsung).....	49
Gambar 4.11	Foto Geopolimer abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan metode impregnasi	49
Gambar 4.12	Foto Geopolimer berasal dari abu layang PLTU Holcim (A). non-impregnasi (langsung) (B) impregnasi	50
Gambar 4.13	Foto geopolimer abu layang PLTU (A) Ketapang dan (B) Wilmar yang tidak berhasil menjadi pasta geopolimer dengan resep dan metode yang sama.	50

Gambar 4.14	Foto geopolimer yang telah diratakan permukaan atas dan bawah.	52
Gambar 4.15	Kuat tekan geopolimer abu layang PLTU Holcim dengan Metode non-impregnasi	53
Gambar 4.16	Kuat tekan geopolimer abu layang PLTU Holcim dengan Metode Impregnasi	53
Gambar 4.17	Kuat tekan geopolimer abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan Metode non-impregnasi	55
Gambar 4.18	Kuat tekan geopolimer abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan Metode impregnasi	55
Gambar 4.19	<i>Setting Time</i> dari abu layang PLTU Holcim dengan metode non-impregnasi dan impregnasi.....	59
Gambar 4.20	<i>Setting Time</i> dari abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan metode non-impregnasi dan impregnasi ..	60

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komposisi campuran geopolimer dengan sumber abu layang yang berbeda	24
Tabel 4. 1	Hasil pengukuran partikel abu layang	36
Tabel 4. 2	Ukuran partikel abu layang (μm)	37
Tabel 4. 3	Hasil pengukuran uji kelarutan.....	39
Tabel 4. 4	Hasil analisa komposisi abu layang menggunakan XRF	41
Tabel 4. 5	Klasifikasi tipe abu layang yang digunakan dalam pembuatan geopolimer berdasarkan data XRF.....	42
Tabel 4. 6	Penjelasan hasil visual abu layang PLTU (A) Holcim, (B) Paiton 1-2, (C) Ketapang, dan (D) Wilmar	47
Tabel 4. 7	Hasil pengamatan sintesis geopolimer	48
Tabel 4. 8	Nilai pH pada setiap umur geopolimer.....	57
Tabel 4. 9	<i>Final setting time</i> abu layang PLTU Holcim dan Paiton 1-2	58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Abu layang adalah limbah industri yang dihasilkan oleh pembangkit listrik, industri metalurgi, dan industri kimia yang menggunakan batubara. Sumber abu layang terbesar adalah pembangkit listrik yang menggunakan batu bara sebagai sumber energinya sehingga dihasilkan abu layang yang sangat besar yaitu sekitar 15-40% berat dari massa batu yang digunakan (Guo dkk., 2017). Sifat-sifat abu layang sangat bergantung pada jenis batubara yang digunakan dan juga proses pembakarannya. Oleh karena itu abu layang yang dihasilkan memiliki komposisi kimia seperti rasio Si/Al, ukuran partikel dan sebarannya yang tidak akan sama meskipun dihasilkan dari tempat yang sama. Sifat-sifat fisika-kimia tersebut akan sangat mempengaruhi proses geopolimerisasi dari abu layang (Fansuri dkk., 2008).

Saat ini abu layang telah banyak digunakan untuk meningkatkan kemanfaatannya sebagai sumber aluminosilikat. Abu layang dapat menjadi prekursor utama bagi material salah satunya geopolimer. Geopolimer adalah generasi baru bagi material anorganik aluminosilikat. Geopolimer disintesis dengan mengaktifkan prekursor utama aluminosilikat menggunakan larutan pengaktif basa alkali hidoksida dan larutan silikat (Davidovits, 1989 dan Davidovits, 1991). Banyak sekali metode yang digunakan untuk memaksimalkan kualitas geopolimer berbasis abu layang. Kualitas geopolimer didapatkan melalui uji kekuatan tekan, dimana geopolimer ditekan dengan beban hingga pecah. Menurut Fansuri dkk. (2008) faktor lain yang mempengaruhi kekuatan tekan yaitu ukuran partikel dan sebarannya, kelarutan Si dan Al dari abu layang, komposisi senyawa oksida serta sifat fisika-kimia yang lainnya.

Selain sifat-sifat diatas terdapat beberapa faktor-faktor lainnya yaitu rasio $\text{Na}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam jaringan geopolimer. Abu layang yang dihasilkan pada setiap PLTU akan

memiliki sifat-sifat yang berbeda, bahkan abu layang yang diambil pada waktu yang berbeda juga memiliki karakteristik yang berbeda. Sehingga geopolimer yang dihasilkan juga berbeda. Kualitas abu layang dalam pembuatan geopolimer tergantung pada komposisi yang terkandung. Pada rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ rendah, kekuatan awal sangat tergantung pada besarnya Al_2O_3 (Al mengontrol waktu pengerasan) (Puspitasari dan Atmaja, 2009). Dalam pembuatan geopolimer yang dilakukan oleh Atmaja dkk., tahun 2011 menggunakan tambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ untuk menyeimbangkan Si/Al dan pengaruhnya terhadap kekuatan tekan geopolimer. Hasil rasio Si/Al yang melebihi 3,5 memiliki kekuatan tekan yang tinggi bahkan hingga 65 Mpa (Atmaja dkk., 2011). Sehingga dalam penelitian ini digunakan penambahan spesi Al untuk menyesuaikan rasio Si/Al untuk mendapatkan kekuatan tekan yang maksimal. Kekuatan tekan ini menjadi angka yang krusial karena menjadi dasar kualitas geopolimer yang dihasilkan. Nilai kekuatan ini berdasar pada standar SNI 03-0349 tahun 1989 dimana, nilai standar kekuatan tekan batako sebesar 9,8 MPa.

Penelitian ini juga digunakan metode yang berbeda untuk penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$, yaitu metode non-impregnasi (langsung) dan impregnasi. Perbedaan ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh distribusi Si/Al yang merata dalam geopolimer. Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji sifat fisika-kimia dari abu layang yang dihasilkan dari berbagai sumber tempat abu layang tersebut diperoleh melalui uji XRD, XRF, PSA, SEM, uji kelarutan, uji kuat tekan, uji pH dan *setting time* pada geopolimer yang telah dibuat.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana kekuatan mekanik geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang, dan Wilmar?
2. Apakah geopolimer berbahan dasar abu layang telah sesuai dengan SNI bata beton 03-0349-1989?

3. Apakah komposisi fasa dan kekristalan, morfologi, distribusi partikel, kelarutan Si dan Al, komposisi senyawa abu layang dapat mempengaruhi kekuatan tekan?
4. Bagaimana pengaruh perbedaan metode dari non-impregnasi dan impregnasi terhadap geopolimer?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan geopolimer yang sesuai dengan SNI bata beton 03-0349-1989 sebesar 9,8 Mpa.
2. Mengetahui kekuatan mekanik dari geopolimer berbahan dasar abu layang yang bersumber dari PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang, dan Wilmar.
3. Mengetahui pengaruh komposisi fasa dan kekristalan, morfologi, distribusi partikel, kelarutan Si dan Al, komposisi senyawa abu layang terhadap kekuatan tekan geopolimer.
4. Mengetahui pengaruh perbedaan metode non-impregnasi dan impregnasi terhadap geopolimer berbahan dasar abu layang.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang pembaruan metode geopolimer berbahan abu layang yang bersumber dari beberapa PLTU yang berbeda. Metode pembuatan geopolimer berbahan dasar abu layang yang dihasilkan diharapkan mampu menghilangkan ketergantungan kepada kualitas abu layang yang digunakan dalam pembuatan geopolimer. Kualitas geopolimer selalu dapat dihasilkan walaupun berasal dari sumber abu layang yang berbeda-beda.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geopolimer

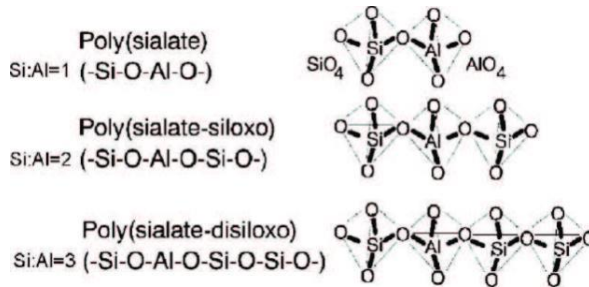
Terminologi geopolimer pertama kali digunakan oleh Profesor Davidovits pada tahun 1978 untuk menjelaskan tentang mineral polimer yang dihasilkan melalui *geochemistry*. Istilah “geo” mengacu pada material pengikat berasal dari alam seperti batuan dan material lainnya (Davidovits, 1999). Geopolimer adalah bentuk polimer alumino-silikat yang disintesis melalui material banyak mengandung silikon (Si) dan aluminium (Al) yang berasal dari alam atau dari material hasil sampingan industri. Selama proses sintesis, ion-ion silikat dan alumuninatt menyatu dan membentuk blok yang secara kimia memiliki struktur yang mirip dengan batuan alam. Komponen pembentuk geopolimer ada dua yaitu:

1. Komponen solid yang mengandung SiO_2 dan Al_2O_3 dalam jumlah yang cukup untuk bisa membentuk senyawa (seperti abu layang, pozzolon, slag dll).
2. Cairan alkali sebagai komponen aktivator yang meliputi alkali hidroksida, silika, alumina, karbon dan sulfat atau kombinasi keduanya.

Pada saat komponen solid dan komponen aktivator dicampur terjadi proses pengerasan yang disebabkan oleh terbentuknya *aluminosilicate network* (jaringan aluminosilikat) yang bervariasi antara amorf dan kristalin (Putra dkk., 2014).

Geosintesis atau geopolimerisasi pada umumnya dapat ditunjukkan dengan reaksi dari campuran padatan aluminosilikat dengan larutan alkalin pada kondisi basa yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al-O. Ikatan polimer dibentuk oleh unit-unit monomer yang bergantung pada rasio silika/alumina. Ada Tiga unit monomer yang berbeda yaitu *Polysialate* (PS) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$ (-Si-OAl-O-), *Polysialatexiloxo* (PSS) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$ (-Si-O-Al-O-Si-O), *Polysialatedixiloxo* (PSDS) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3$ (-Si-O-Al-O-

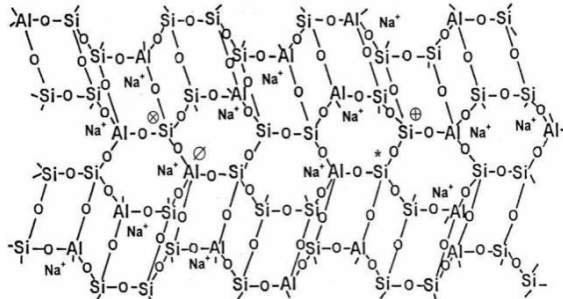
Si-O-SiO-) (Olawale, 2013). Struktur dari unit-unit monomer geopolimer telah digambarkan pada Gambar 2.1 berikut :



Gambar 2. 1 Struktur tiga unit monomer pembentuk geopolimer (Skvara, 2007)

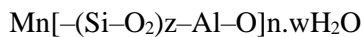
Pada Gambar 2.1 unit-unit monomer ini akan terus menyambung hingga membentuk pola polimer pada geopolimer. Struktur jaringan tiga dimensi dari geopolimer dibentuk oleh tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 yang dihubungkan bersama oleh jembatan atom oksigen. Jembatan oksigen akan mengakibatkan muatan negatif pada Al karena Al dalam AlO_4 memiliki bilangan oksidasi empat. Muatan negatif diseimbangkan oleh kation-kation logam alkali atau alkali tanah (Na) (Skvara, 2007). Produk geopolimer yang terbentuk dapat berupa amorf maupun semikristalin tergantung pada suhu geopolimerisasi (Olawale, 2013).

Davidovits, 1999 telah menggambarkan hasil dari proses bergabungnya unit monomer hingga membentuk polimer tiga dimensi dengan dijembatani oksigen yang terus berlanjut dan membesar pada sistem geopolimer ditambah dengan penyeimbangan dengan logam alkali (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) (Davidovits, 1999) seperti pada Gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2. 2 Struktur geopolimer model Davidoits (Olawale, 2013)

Geopolimer memiliki rumus empiris untuk menjelaskan struktur tiga dimensi aluminosilikat. Rumus empiris geopolimer adalah:



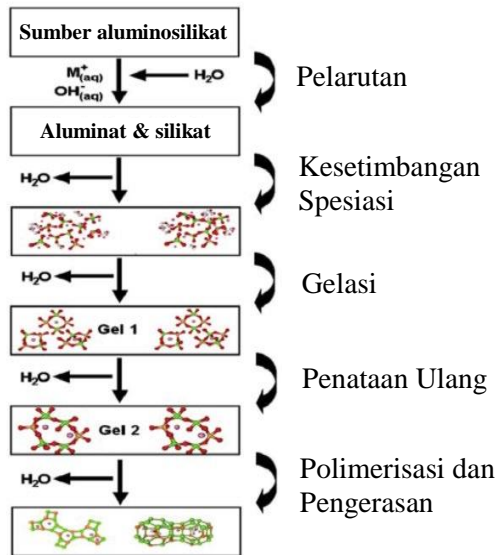
Dimana “M” adalah unsur alkali, simbol “-” menunjukkan adanya ikatan, “z” berupa 1, 2, 3 dan “n” adalah derajat polimerisasi, serta “w” adalah banyaknya air (H₂O) yang diikat (Olawale, 2013).

2.2 Reaksi Geopolimerisasi

Reaksi geopolimerisasi adalah reaksi yang berlangsung selama pembentukan geopolimer. Reaksi geopolimerisasi merupakan reaksi eksotermis dan telah diasumsikan bahwa pembentukan jaringan geopolimer melalui oligomer (dimer, trimer) yang menyediakan unsur dengan bentuk tiga dimensi. Geopolimerisasi melibatkan reaksi kimia heterogen antara aluminosilikat oksida dan larutan larutan pengaktif basa pada kondisi sangat basa dan suhu ruang sehingga menghasilkan struktur polimer yang amorf hingga semi- kristalin serta mengandung ikatan Si-O-Al dan Si-O-Si (Abdullah dkk., 2011).

Pada Gambar 2.3 akan dijelaskan bahwa reaksi geopolimerisasi dimulai dengan pencampuran sumber aluminosilikat dengan larutan larutan pengaktif basa yang menyebabkan reaksi yang menghasilkan gel aluminosilikat yang tidak teratur. Larutan larutan pengaktif basa menyediakan ion

alkali dan ion hidroksi. Setelah pelarutan yang cukup, aluminat dan silikat mengalami kesetimbangan spesiasi, dan jaringan aluminosilikat mulai membentuk gel. Gel melakukan penataan ulang dan membentuk struktur gel yang berbentuk polimer dan mengeras. Perlu dicatat bahwa gelasi, penataan ulang, polimerisasi dan pengerasan dapat terjadi secara bersamaan. Setelah reaksi selesai, air masuk ke dalam struktur pori gel (Kim, 2012).



Gambar 2. 3 Reaksi Geopolimerisasi (Kim, 2012)

Hal yang sama juga dijelaskan oleh (Hamidi dkk., 2016) bahwa geopolimer terjadi dalam beberapa tahap dimana tahap pertama melibatkan pelepasan silikat dan aluminat sebagai bahan awal yang diaktifkan oleh alkalidan menghasilkan gel geopolimer. Hidrolisis terjadi pada tahap kedua dimana keberadaan molekul air membantu lebih lanjut memutus ikatan dan memungkinkan untuk tetrahedral silikat dan aluminat terhubung satu sama lain menghasilkan prekursor polimer. Polikondensasi terjadi pada tahap

akhir dimana gel geopolimer membeku dan membentuk jaringan aluminosilikat tiga dimensi.

2.3 Abu layang

Abu layang adalah padatan halus dan mengkilat yang ditemukan sebagai hasil dari pembakaran batu bara dalam pembangkit listrik. Secara kimia abu layang merupakan material oksidasi anorganik yang mengandung silika dan alumina aktif karena sudah melalui proses pembakaran pada suhu tinggi. Salah satu penghasil limbah abu layang terbesar di dunia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), termasuk Indonesia. Di Indonesia terdapat banyak PLTU yang beroperasi. Semakin banyak PLTU yang beroperasi, semakin banyak pula limbah abu batubara yang dihasilkan. Komposisi abu layang tergantung pada sumber abu layang, tetapi semua abu layang mengandung sejumlah besar silikon dioksida (SiO_2), yang hadir dalam dua fasa yaitu amorf, dan kristal, serta kalsium oksida (CaO), aluminium oksida (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3). Abu layang telah terbukti menjadi salah satu *starting material* (bahan utama) pada sintesis geopolimer (Olawale, 2013).

Berdasarkan kandungan kalsium, silika, alumina dan besi ada dua tipe utama abu layang yaitu abu layang tipe-C dan tipe-F. Perbedaan utama antara tipe abu layang ini adalah jumlah kandungan dari kalsium, silika, alumina, dan besi pada abu layang. Sumber batu bara selalu menentukan komposisi kimia dari abu layang. Pembakaran yang lebih dari batu bara *anthracite* dan batu bara bituminus menghasilkan abu layang tipe-F sedangkan abu layang tipe-C dihasilkan dari hasil pembakaran batu bara *lignite* dan batu bara sub bituminus. Abu layang tipe-F yang telah diteliti mengandung kurang dari 20% CaO sedangkan abu layang tipe-C mengandung lebih dari 20% CaO (Olawale, 2013). Berdasarkan komposisi kimianya, ASTM C618 mengelompokkan abu layang ke dalam tiga kelas yaitu kelas N, F, dan kelas C yang dijabarkan pada Tabel 2.1. abu layang kelas N merupakan material pozzolan alami yang terkalsinasi.

Tabel 2.1 Pengelompokan kelas abu layang berdasarkan ASTM C618 1994

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

Sumber : (Wardani, 2008)

2.4 Larutan pengaktif basa

Larutan pengaktif basa dibutuhkan untuk reaksi polimerisasi monomer alumina dan silika. Larutan alkali mengaktifkan prekursor (abu layang) dengan melarutkan SiO_2 dan Al_2O_3 menjadi bentuk monomer $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Selama proses *curing*, monomer–monomer tersebut terkondensasi dan membentuk jaringan polimer tiga-dimensi yang berikatan silang. Ion alkali bertindak sebagai penetral muatan (*charge balancer*) untuk tiap molekul tetrahedron $[\text{AlO}_4]^{5-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ (Putra dkk., 2014). Larutan pengaktif basa yang digunakan umumnya adalah natrium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH). Natrium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam abu layang sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat (Manuahe dkk., 2014). Larutan natrium silikat (*water glass*) adalah aktivator yang secara umum digunakan karena mudah didapat dan ekonomis. Penambahan aktivator sodium hidroksida bertujuan untuk menambah ion Na pada proses polimerisasi (Putra dkk., 2014).

2.4.1 Natrium Hidroksida (NaOH)

Logam alkali yang sering digunakan sebagai aktivator adalah Natrium (Na) dan Kalium (K). Natrium Hidroksida merupakan oksida alkali yang reaktif dan merupakan basa yang kuat. Logam alkali adalah kelompok unsur kimia pada golongan I

Tabel periodik, kecuali hidrogen. Kelompok ini terdiri dari Litium (Li), Natrium (Na), Kalium (K), Rubidium (Rb), Cesium (Cs). Semua unsur pada kelompok ini sangat reaktif sehingga secara alami tak pernah ditemukan dalam bentuk tunggal. Massa molekul relatif NaOH adalah 40 gram/mol. Natrium hidroksida dapat mengabsorpsi CO₂ dari udara, sangat korosif pada jaringan serta menghasilkan panas (eksotermis) saat dilarutkan dalam air atau ketika dilarutkan dalam asam. NaOH berbentuk pelet dengan kemurnian mencapai 97-98% (Windholz, 1976). Larutan alkali untuk menghasilkan kuat tekan geopolimer yang paling baik adalah campuran NaOH dengan natrium silikat dan KOH dengan kalium silikat (Palomo dkk, 1999).

2.4.2 Natrium Silikat (Na₂SiO₃)

Natrium silikat merupakan oksida silikat yang berbentuk seperti gel bening berwarna kehijauan. Jika dibiarkan di udara bebas gel ini akan berbentuk seperti kaca. Natrium silikat mengandung Na₂O, SiO₂, dan H₂O dalam jumlah tertentu. Kehadiran natrium silikat penting perannya dalam sintesis geopolimer yakni dapat meningkatkan kuat tekan geopolimer, dimana kuat tekan geopolimer mengalami peningkatan secara linier seiring dengan peningkatan kandungan silikat yang terkandung dalam natrium silikat. Banyaknya silikat terlarut diperlukan untuk inisiasi pembentukan oligomer (monomer, dimer, trimer dan tetramer) dan polikondensasi dari silikat atau oligomer aluminosilikat yang dapat meningkatkan efisiensi geopolimerisasi (Panias dkk., 2001).

2.5 X-Ray Diffraction (XRD)

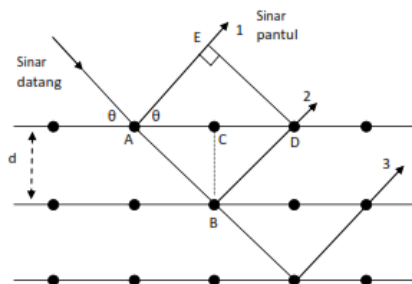
Metode difraktometer sinar-X (XRD = *X-ray Diffraction*) adalah metode yang menganalisis kandungan mineral berdasarkan struktur kristalin. Sinar-X ditemukan pertama kali oleh Wilhelm Conrad Rontgen pada tahun 1895. Karena asalnya tidak diketahui waktu itu maka disebut sinar-X. Disamping itu, sinar-X dapat juga digunakan untuk menghasilkan pola difraksi tertentu yang dapat

digunakan dalam analisis kualitatif dan kuantitatif material. Gambar 2.4 menjelaskan bahwa waktu suatu material dikenai sinar-X, maka intensitas sinar yang ditransmisikan lebih rendah dari intensitas sinar datang. Sinar yang dipantulkan dari atom A akan berbeda dengan atom B. Hal ini disebabkan adanya penyerapan oleh material dan juga penghamburan oleh atom-atom dalam material tersebut. Berkas sinar-X yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada juga yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan itulah yang disebut sebagai berkas difraksi.

Dasar dari penggunaan difraksi sinar-X untuk mempelajari kisi kristal adalah berdasarkan persamaan Bragg:

$$n\lambda = 2.d.\sin \theta ; n = 1,2,\dots$$

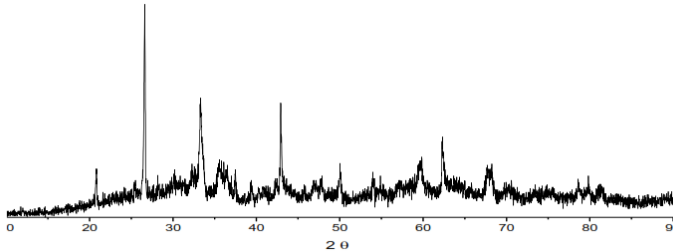
dimana, n = urutan difraksi; λ = panjang gelombang sinar-X; d = jarak antar bidang kristal; dan θ = sudut difraksi.



Gambar 2. 4 Pantulan sinar-X pada bidang kristal

Berdasarkan persamaan Bragg, jika seberkas sinar-X dijatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal itu akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang sama dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor kemudian diterjemahkan sebagai sebuah puncak difraksi. Makin banyak bidang kristal yang terdapat dalam sampel, makin kuat intensitas pembiasan yang

dihasilkannya. Tiap puncak yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi.



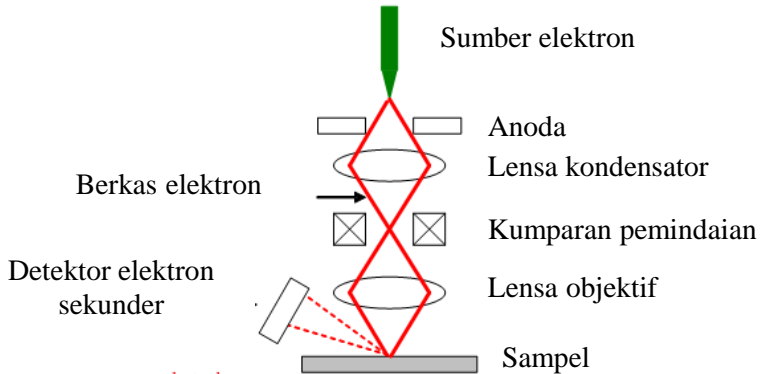
Gambar 2. 5 Difraktogram sinar-X abu layang PT. IPMOMI (Supriadi, 2017)

XRD dapat digunakan untuk menentukan komposisi dari mineral dan kristalinitas pada sampel abu layang dan geopolimer. Pola difraktogram dari XRD akan dapat memprediksi keberhasilan dari pembuatan geopolimer. Geopolimer dapat bereaksi dengan abu layang yang bersifat amorf. Tanda bahwa abu layang tersebut bersifat amorf yaitu adanya gundukan (*hump*) pada $2\theta = 20-40^\circ$. Sesuai dengan difraktogram pada Gambar 2.5 bahwa terdapat gundukan (*hump*). Sehingga abu layang PT. IPMOMI diprediksi memiliki keberhasilan dalam pembuatan geopolimer.

2.6 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menggambar profil permukaan benda. SEM terdiri dari sebuah senapan elektron yang memproduksi berkas elektron pada tegangan dipercepat 2 sampai 30 kV. Berkas elektron tersebut dilewatkan pada beberapa lensa elektromagnetik untuk menghasilkan gambar berukuran ~ 10 nm pada sampel yang ditampilkan dalam bentuk film fotografi atau dalam tabung layar. SEM sangat cocok digunakan dalam situasi yang membutuhkan

pengamatan permukaan kasar dengan perbesaran berkisar antara 20-500.000 kali (Mirawati, 2016). Prinsip dari SEM adalah *scanning*.



Gambar 2. 6 Skema dan cara kerja SEM (Mirawati, 2016)

Langkah kerja dari Gambar 2.6 yang merupakan *Scanning Microscopy* di atas adalah dengan menembakkan sinar elektron melalui sebuah pistol elektron kemudian sinar elektron tersebut dipercepat dengan anoda. Selanjutnya lensa magnetik memfokuskan elektron menuju ke sampel. Sinar elektron yang terfokus memindai (*scan*) keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai. Ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor (CRT). SEM dapat menghasilkan karakteristik bentuk 3 dimensi yang berguna untuk memahami struktur permukaan dari suatu sampel (Mirawati, 2016). SEM hanya memanfaatkan SE dan BSE untuk memperoleh informasi struktur mikro, sedangkan sinar-X digunakan untuk menganalisa komposisi kimia pada permukaan sampel. Sampel yang akan dikarakterisasi dengan SEM, harus mempunyai permukaan yang relatif rata dan halus (Johan, 2009).

2.7 Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP)

Metode ICP merupakan salah satu metode menggunakan spektroskopi emisi nyala. Metode ini juga dapat menentukan kandungan logam Cd, Cu, Pb, Zn, Fe dan masih banyak logam-logam lain yang dapat terdeteksi dengan konsentrasi terendah sampai tingkat ppb. Metode ICP adalah suatu metode yang sensitif, cepat dan sedikit interferensi kimia. Hal tersebut dikarenakan pada temperatur yang tinggi plasma akan mengeliminasi interferensi kation maupun anion (Rattanaphani dan Liawruanggrath., 2005). Kelebihan dari alat ini adalah sangat selektif dan dapat digunakan untuk mengukur beberapa unsur sekaligus dalam setiap pengukuran, tetapi dengan semakin banyak permintaan pengukuran ternyata alat ini mempunyai kelemahan yaitu kurang sensitif terhadap pengukuran unsur yang mempunyai panjang gelombang dibawah 200 nm. Keterbatasan pengukuran tersebut ditunjukkan dengan nilai limit deteksi yang diperoleh (Nugroho dkk., 2005).

Prinsip kerja alat ICP pada pengukuran ini adalah mengukur intensitas energi/radiasi yang dipancarkan oleh unsur-unsur yang mengalami perubahan tingkat energi atom (eksitasi atau ionisasi). Larutan sampel dihisap dan dialirkan melalui *capillary tube* ke *nebulizer*. *Nebulizer* merubah larutan sampel kebentuk *aerosol* yang kemudian diinjeksikan oleh ICP. Pada temperatur plasma, sampel-sampel akan teratomisasi dan tereksitasi. Atom yang tereksitasi akan kembali ke keadaan awal (*ground state*) sambil memancarkan sinar radiasi. Sinar radiasi ini didispersi oleh komponen optik. Sinar yang terdispersi, secara berurutan muncul pada masing-masing panjang gelombang unsur dan dirubah dalam bentuk sinyal listrik yang besarnya sebanding dengan sinar yang dipancarkan oleh besarnya konsentrasi unsur. Sinyal listrik ini kemudian diproses oleh sistem pengolah data (Nugroho dkk., 2005).

2.8 Particle Size Analyzer (PSA)

Analisis *particle size analyzer* (PSA) digunakan untuk mengetahui distribusi ukuran dari suatu partikel. Alat ini menggunakan metode *laser diffractions* (LAS). Digunakan metode LAS karena metode ini dinilai lebih akurat bila dibandingkan dengan metode analisis gambar maupun metode ayakan (*sieve analysis*), terutama untuk sampel-sampel dalam ukuran nanometer maupun submikron. Metode ini menjadi prinsip dasar dalam instrumen *Particle Size Analyzer* (PSA). Prinsip dari *laser diffraction* sendiri ialah ketika partikel-partikel melewati berkas sinar laser dan cahaya dihamburkan oleh partikel-partikel tersebut dikumpulkan melebihi rentang sudut yang berhadapan langsung. Distribusi dari intensitas yang dihamburkan ini dianalisis oleh komputer sebagai hasil distribusi ukuran partikel (James, 1991).

Penggunaan metode LAS pada *Particle Size Analyzer* (PSA) terdapat dua buah metode dalam pengukuran menggunakan antara lain metode basah dan kering. Metode basah, metode ini menggunakan media pendispersi untuk mendispersikan material uji. Sedangkan metode kering, merupakan metode yang memanfaatkan udara atau aliran udara yang berfungsi untuk melarutkan partikel dan membawanya ke *sensing zone*. Metode ini baik digunakan untuk ukuran yang kasar, dimana hubungan antar partikel lemah dan kemungkinan untuk beraglomerasi kecil (James, 1991). PSA juga merupakan alat yang mampu mengukur partikel distribusi ukuran emulsi, suspensi dan bubuk kering. Hal ini dapat melakukan berbagai analisis dalam penggunaan operasi yang sangat ramah lingkungan.

1. Keunggulannya antara lain: Akurasi dan reproduksibilitas berada dalam $\pm 1\%$
2. Mengukur berkisar dari 0,02 nm sampai 2000 nm
3. Dapat digunakan untuk pengukuran distribusi ukuran partikel emulsi, suspensi, dan bubuk kering (Ehsan dkk., 2016).

2.9 XRF

X-Rays Fluorescence (XRF) adalah salah satu metode analisis yang digunakan untuk menganalisis komposisi dalam suatu sampel atau bahan secara kualitatif. Prinsip kerja metode analisis XRF berdasarkan terjadinya tumbukan atom-atom pada permukaan sampel oleh sinar-X dari sumber sinar X. Hasil analisis kualitatif ditunjukkan oleh spektrum yang mewakili jenis unsur yang sesuai dengan energi sinar-X sedangkan untuk analisa kuantitatif diperoleh dengan membandingkan sampel dengan standar. Dalam analisis kuantitatif faktor-faktor yang berpengaruh dalam analisis antara lain adalah matriks bahan, kondisi kevakuman dan konsentrasi unsur dalam bahan, pengaruh unsur yang memiliki energi karakteristik unsur yang dianalisis (Kriswarini dkk., 2010). Analisis XRF dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan karakteristik sinar-X yang terjadi akibat efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi karena elektron dalam atom target pada sampel terkena sinar berenergi tinggi (Beckhoff dkk., 2006).

2.10 Kekuatan Tekan

Kekuatan tekan adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan persatuan luas. Kuat tekan beton mengidentifikasi mutu dari sebuah struktur. Semakin tinggi kekuatan struktur dikehendaki, semakin tinggi pula mutu betonyang dihasilkan (Mulyono, 2005). Pada mesin uji tekan benda diletakkan dan diberikan beban sampai benda runtuh saat itulah beban maksimum bekerja (Mulyono, 2004). Kekuatan tekan beton akan bertambah dengan naiknya umur beton, dimana kekuatan tekanbeton akan naik secara cepat hingga umur 28 hari tetapi setelah itu tidak ada peningkatan yang signifikan. Beton akan memiliki kekuatan tekan yang tinggi jika tersusun dari dahan yang berkualitas baik. Bahan penyusun beton yang perlu mendapat perhatian adalah agregat karena agregat mencapai 70-75% volume beton (Dipohusodo, 1996).

Rumus untuk menentukan kekuatan tekan dapat dilihat dari persamaan 2.1 :

$$f'c = \frac{P}{A} \text{ (Mpa = N/mm}^2\text{)} \dots \dots \dots (2.1)$$

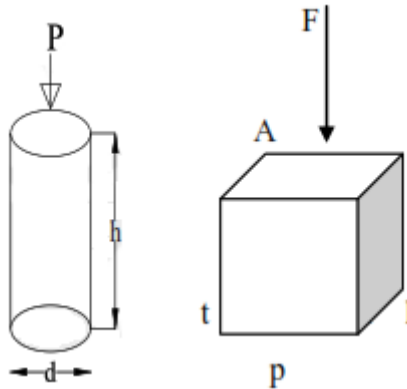
dimana,

$f'c$ = kekuatan tekan (N/mm²)

P = gaya tekan (N)

A = luas penampang beton (mm²)

Beton memiliki dimensi benda uji standar yang dapat berbentuk silinder dengan perbandingan 1:2 untuk diameter:tinggi dan kubus dengan perbandingan 1:1:1. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Dimensi ukuran beton

2.11 pH

pH adalah ukuran perkiraan keasaman atau alkalinitas suatu larutan dan didefinisikan sebagai logaritma negatif dari konsentrasi ion hidrogen bebas. Perubahan pH larutan mencerminkan perubahan sepuluh kali lipat dalam konsentrasi H⁺ (Grubb dkk., 2007). pH dalam beton menjadi parameter penting karena menunjukkan tingkat alkalinitas beton. Biasanya pH beton berada pada kisaran 12,5-13 (Behnood dkk., 2016). Selain itu nilai pH beton memiliki pengaruh terhadap karbonasi dan korosi baja tulangan. pH beton dapat menurun ataupun meningkat berdasarkan

mekanisme yang terjadi dalam matriks. Peningkatan pH dapat disebabkan oleh banyaknya pelepasan alkali yang diikuti oleh pembubaran lebih lanjut dari trikalsium aluminat (C_3A) dan menghasilkan presipitasi ettringite. Nilai pH meningkat dari waktu ke waktu dikarenakan adanya hidrasi lanjutan yang menghasilkan pelepasan jumlah alkali yang hampir konstan dalam larutan. Menurut (Behnood dkk., 2016) penurunan pH dapat disebabkan oleh karbonasi dimana kalsium hidroksida $Ca(OH)_2$ dalam beton berubah menjadi $CaCO_3$. Hal ini bisa mengurangi pH beton bahkan dapat mencapai nilai 9. Penurunan pH ini dapat menyebabkan korosi baja tulangan.

2.12 Impregnasi

Impregnasi adalah proses penjuanan total suatu zat (Kanade dkk., 2006; Lestari, 2006). Metode ini sering digunakan untuk mensintesis katalis. Tujuan metode ini yaitu mengisi pori-pori prekursor dengan larutan aktif melalui adsorpsi, yaitu dengan merendam prekursor dalam larutan yang mengandung aktif. Dalam hal ini prekursor memiliki fungsi sebagai penyedia permukaan yang luas agar menebarkan situs aktif sehingga permukaan kontak lebih luas dan efisien. Setelah impregnasi langkah selanjutnya adalah pengeringan atau pemanasan sehingga terjadi dekomposisi penyangga menjadi spesi aktif. Terdapat 2 metode impregnasi yaitu, kering dan basah. Penelitian ini menggunakan metode impregnasi basah yang mana dapat menghasilkan prekursor dengan fasa aktif yang sangat banyak setelah proses pengeringan dan juga menghasilkan distribusi fasa aktif pada bagian luar prekursor. Distribusi ini bermanfaat untuk mengurangi penetrasi reaktan ke dalam katalis, sehingga dapat meningkatkan aktivitas katalis. Metode impregnasi basah merupakan metode yang paling sering digunakan (Lestari, 2006).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan

3.1.1 Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan gelas dan non gelas. Peralatan gelas yang digunakan yaitu labu ukur 50 ml, gelas ukur 25 ml, erlenmeyer 250 ml, pipet ukur 1 ml dan 10 ml, buret 50 ml, pipet tetes, dan botol vial. Peralatan non gelas yang digunakan yaitu gelas plastik, wadah plastik, botol PP 100 mL, pengaduk besi, bola hisap, *magnetic stirrer*, kertas indikator pH, plastik *wrap*, kertas saring, aluminium foil, plastik *clip*, toples plastik, corong plastik, cetakan berbentuk silinder dengan dengan rasio diameter dan tinggi yaitu 1:2, neraca analitik, oven, *mixer*, loyang aluminium dan jarum vicat. Semua peralatan berada di Laboratorium Kimia Materail dan Energi.

Instrumen analisis yang digunakan untuk karakterisasi adalah mesin penguji kuat tekan (*universal testing machine*) di laboratorium beton program D3 Teknik Sipil ITS, *X-Ray Diffraction* (XRD) merk Xpert PANalytical, *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES) merk Teledyne-Leeman di Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS, serta *Particle Size Analyzer* (PSA) dan *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang ada di Laboratorium Pusat Pembelajaran PT. Semen Indonesia, Gresik.

3.1.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu layang (PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang, dan Wilmar), natrium hidroksida (NaOH) p.a. dari Merck, natrium silikat (Na_2SiO_3) teknis (*waterglass*) dari PT. Brataco, aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) dari Sigma-Aldrich, asam klorida 37% (HCl 37%), indikator fenolftalein (PP) dan methyl orange (MO), air terdemineralisasi (aqua DM), dan aquades.

3.2 Prosedur Kerja

3.2.1 Preparasi abu layang

Semua abu layang yang berasal dari PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar diayak dengan menggunakan ayakan 100 mesh dan dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 24 jam. Abu layang yang telah dikeringkan selanjutnya dikarakterisasi dengan XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk mengetahui kristalinitas dan komposisi fasa abu layang. XRF (*X-Ray Fluorescence*) digunakan untuk mengetahui komposisi unsur dari abu layang, SEM (*Scanning Electron Microscopy*) untuk mengetahui morfologi dan bentuk partikel abu layang, dan PSA (*Particle Size Analyzer*) digunakan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel abu layang

Penelitian ini menggunakan dua prosedur yang berbeda, yaitu non-impregnasi (langsung) dan impregnasi. Metode yang berbeda ini terletak pada *treatment* abu layang yang akan digunakan. Abu layang yang digunakan pada metode non-impregnasi (langsung) berupa abu layang yang telah diayak, dan dikeringkan saja. Pada metode impregnasi abu layang yang akan digunakan yaitu abu layang yang telah melalui proses pengayakan, pengeringan dan dicampur dengan suspensi $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{aq})}$ hingga seluruh permukaan abu layang basah. Suspensi $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{aq})}$ dibuat dengan mencampurkan 3,4 gram $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$ dengan air terdemineralisasi (Aqua DM). Setelah itu dilakukan pengeringan kembali pada suhu 105 °C selama 24 jam.

3.2.2 Uji Kelarutan Abu Layang

Abu layang dilarutkan ke dalam basa kuat NaOH 10 M dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 5 jam pada suhu ruang. Setelah pengadukan, selanjutnya hasil campuran disaring dan filtratnya dinetralkan menggunakan HCl 37% di dalam lemari asam hingga pH asam-netral. Konsentrasi unsur terlarut diuji menggunakan *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES).

3.2.3 Pembuatan Larutan Pengaktif Basa

Larutan pengaktif basa dibuat dengan cara mereaksikan larutan NaOH 14 M dan larutan Na_2SiO_3 (*waterglass*). Larutan NaOH dibuat dengan melarutkan 28,0 gram $\text{NaOH}_{(s)}$ ke dalam air terdemineralisasi (Aqua DM) hingga volume totalnya menjadi 50 mL. Pembuatan larutan NaOH terjadi reaksi eksotermis sehingga menghasilkan panas. Larutan NaOH tersebut kemudian didiamkan selama 24 jam hingga suhu kembali ke suhu ruang. Selanjutnya, larutan NaOH ditambahkan ke dalam 80,0 gram Na_2SiO_3 kemudian dicampur hingga homogen. Larutan pengaktif basa yang baru saja dibuat akan menghasilkan panas dari reaksi eksotermis sehingga harus didiamkan kembali hingga ke suhu ruang.

3.2.4 Preparasi Cetakan Geopolimer

Cetakan geopolimer dapat berbentuk silinder dengan perbandingan diameter dan tinggi sebesar 1:2 dan kubus dengan perbandingan panjang, lebar dan tinggi sebesar 1:1:1. Cetakan geopolimer yang digunakan pada penelitian ini yaitu cetakan silinder yang terbuat dari pipa PVC. Bagian dalam dilapisi oleh vaselin agar pasta geopolimer yang telah kering mudah dikeluarkan dari cetakan. Bagian bawah ditutupi oleh plastik *wrap* dan diikat dengan karet agar pasta geopolimer tidak merembes keluar dari cetakan.

3.2.5 Sintesis Geopolimer

Sebagaimana telah diuraikan di bagian sebelumnya, sintesis geopolimer dilakukan dengan dua metode, metode non-impregnasi (langsung) dan impregnasi. Abu layang yang telah disiapkan akan dicampur dengan larutan pengaktif basa. Komposisi bahan-bahan yang digunakan pada sintesis geopolimer dijabarkan pada Tabel 3.1. Tahap pertama dari metode non-impregnasi yaitu mencampurkan 3,4 gram serbuk $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$ dengan 24,5 mL air terdemineralisasi (Aqua DM) ke dalam abu layang. Campuran diaduk menggunakan *mixer* selama beberapa

menit hingga homogen. Tahap kedua memasukkan larutan pengaktif basa dan diaduk menggunakan *mixer* selama 4 menit.

Pada metode impregnasi, abu layang yang telah diaktifasi oleh $\text{Al}(\text{OH})_3$ dicampur dengan larutan pengaktif basa dan 24,5 mL Aqua DM. Campuran ini kemudian diaduk menggunakan *mixer* selama 4 menit. Hasil dari pencampuran bahan-bahan akan membentuk pasta. Pasta geopolimer selanjutnya dimasukkan ke dalam cetakan yang berbentuk silinder dengan rasio diameter dan tinggi yaitu 1:2. Pasta geopolimer yang telah dicetak kemudian didiamkan dalam suhu ruang hingga mengeras. Geopolimer yang telah mengeras dapat dikeluarkan dari cetakan. Vaselin yang menempel pada bagian luar geopolimer dibersihkan dahulu dan dimasukkan ke dalam plastik klip kemudian dioven selama 24 jam dengan suhu $55\text{ }^\circ\text{C}$ (*temperature curing*). Setelah melewati proses *temperature curing*, geopolimer dibiarkan dalam suhu ruang selama 7, 14, dan 28 hari.

Tabel 3. 1 Komposisi campuran geopolimer dengan sumber abu layang yang berbeda

Bahan - Bahan	Komposisi Abu Layang			
	Holcim	Paiton 1-2	Ketapang	Wilmar
Abu Layang (g)	260,0	260,0	260,0	260,0
$\text{Al}(\text{OH})_3$ (g)	3,4	3,4	3,4	3,4
Aqua DM (ml)	24,5	24,5	24,5	24,5
Larutan NaOH (ml)	50,0	50,0	50,0	50,0
Waterglass (g)	80,0	80,0	80,0	80,0

3.2.6 Pengujian *Setting Time*

Pasta geopolimer yang telah dituang ke dalam cetakan dapat mengeras kurang ataupun lebih dari 24 jam. Setiap geopolimer memiliki waktu yang berbeda-beda tergantung pada sumber abu layang. Sehingga dengan melakukan *setting time* akan terlihat dengan spesifik kapan geopolimer tepat mengeras.

Pengujian *setting time* ini menggunakan jarum vicat. Setiap beberapa menit sekali pasta geopolimer ditancapkan jarum vicat yang telah memiliki beban. Jarum vicat akan menancap masuk ke dalam geopolimer dan diukur ketinggiannya. Pengujian ini dilakukan pada geopolimer dengan metode non-impregnasi (langsung) dan impregnasi.

3.2.7 Standarisasi HCl

Standarisasi HCl dilakukan sebelum pengujian pH geopolimer. Standarisasi HCl dilakukan karena HCl berperan sebagai titran yang telah diketahui konsentrasinya. Standarisasi HCl dilakukan dengan dua tahap titrasi. Tahap pertama titrasi digunakan NaOH yang akan distandarisasi terlebih dahulu dengan asam oksalat ($H_2C_2O_4$) yang merupakan larutan baku primer. Larutan NaOH dibuat dengan melarutkan 0,4 gram hingga volume total menjadi 100 ml aquades. Larutan NaOH kemudian diambil 10 ml kemudian diberi indikator *fenolftalein* untuk dititrasi dengan asam oksalat ($H_2C_2O_4$) 0,1 M. Volume asam oksalat yang berkurang dicatat dan hal ini dilakukan sebanyak tiga kali untuk diambil nilai rata-rata. Konsentrasi NaOH yang didapat dimasukkan ke dalam persamaan 3.1 :

$$C_{NaOH} = \frac{V_{Asam\ oksalat} \times N_{Asam\ oksalat}}{V_{NaOH}} \quad (3.1)$$

Tahap kedua yaitu larutan NaOH yang telah distandarisasi kemudian digunakan sebagai titran untuk menstandarisasi HCl. Larutan HCl 0,01 M sebanyak 10ml diberi indikator *fenolftalein* (PP) kemudian dititrasi hingga terjadi perubahan warna menjadi merah muda. Catat volume NaOH yang digunakan untuk menentukan konsentrasi HCl dengan persamaan 3.2. Hal ini diulangi hingga tiga kali untuk mendapatkan nilai rata-rata.

$$C_{HCl} = \frac{V_{NaOH} \times N_{NaOH}}{V_{HCl}} \quad (3.2)$$

3.2.8 Pengujian pH

Geopolimer yang telah berhasil disintesis dan memiliki umur 7,14, dan 28 hari dilakukan pengujian pH sesuai dengan ASTM D 1067-92. Geopolimer dihaluskan dan dilarutkan ke dalam aquades dengan perbandingan 1:2 selama 1 menit menggunakan *magnetic stirrer* untuk melepas ion OH⁻. Hasil pencampuran geopolimer dengan aquades disaring untuk mendapatkan filtrat. Filtrat atau titran ditetesi indikator *fenolftalein* (PP) sebagai indikator titrasi asam-basa sehingga merubah warna larutan menjadi merah muda. Titrasi dilakukan dengan meneteskan larutan HCl 0,01 M sebagai titran ke dalam titrat dan berakhir ketika mencapai titik akhir yang ditandai dengan perubahan warna menjadi tidak berwarna. Volume titran yang berkurang dicatat sebagai V_{pn} . Kemudian hasil titrasi pertama ditetesi dengan indikator *methyl orange* (MO) hingga berwarna *orange*. Titrasi dilanjutkan kembali hingga titran berwarna kuning. Volume titran yang berkurang dicatat sebagai V_T . Untuk mengetahui konsentrasi OH⁻ dalam filtrat/titrat dihitung dengan persamaan 3.3 dan nilai pH pada persamaan 3.4. Titrasi dilakukan tiga kali dan didapatkan nilai rata-rata.

$$[\text{OH}^-] = \frac{0,01 (2 \times V_{PN} - V_T)}{V_o} \quad (3.3)$$

$$\text{pH} = 14 - \log[\text{OH}^-] \quad (3.4)$$

3.3 Karakterisasi dan Pengujian

3.3.1 Karakterisasi Fasa dan Mineral Abu Layang Menggunakan X-Ray Diffraction (XRD)

Fasa dan kandungan mineral abu layang dari empat sumber yang berbeda dianalisis menggunakan instrumen XRD merk Xpert PANalytical yang terdapat di laboratorium Teknik Material dan Metalurgi ITS. Kondisi operasional difraktogram sinar-X adalah sumber sinar CuK α 1 ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), tegangan dan arusnya sebesar 40kV dan 30 mA. Pengukuran dilakukan pada 2θ mulai dari 5- 95°

dengan kecepatan 2° permenit dengan ukuran langkah (*step size*) $0,02^\circ$.

3.3.2 Karakterisasi Morfologi Abu Layang Menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Abu layang dari empat sumber berbeda dianalisis menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM) yang ada di Laboraturium Energi dan Lingkungan ITS. Analisis SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi dari abu layang. Gambar yang diperoleh dibandingkan dan dilihat secara detail bentuk dan sebaran partikelnya.

3.3.3 Karakterisasi Komposisi Unsur Abu Layang menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) digunakan untuk mengukur komposisi kimia empat abu layang yang berbeda. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur yang terdapat di dalam abu layang. Analisis XRF dilakukan di Laboraturium Pusat Pembelajaran PT. Semen Indonesia, Gresik.

3.3.4 Karakterisasi Kandungan Si dan Al Abu Layang menggunakan *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES)

Analisis *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry* dilakukan untuk mengetahui konsentrasi unsur Si dan Al melalui uji kelarutan. Abu layang dari empat sumber berbeda dilarutkan dalam larutan NaOH 10 M. Analisis ICP-OES merk Teledyne-Leeman dilakukan di Laboraturium Energi dan Lingkungan ITS.

3.3.5 Uji Kuat Tekan

Sampel geopolimer yang disintesis dan telah mencapai usia 7, 14, dan 28 hari diuji kekuatan tekannya menggunakan mesin penguji kuat tekan (*universal testing machine*) di Laboraturium Beton Program D3 Teknik Infrastruktur ITS. Setiap pengujian kuat

3 sampel geopolimer diuji untuk didapatkan nilai kuat tekan rata-rata. Data yang diperoleh merupakan massa beban yang diberikan kepada geopolimer dalam satuan Newton. Nilai kuat tekan geopolimer selanjutnya dikonversi untuk dilaporkan dalam satuan MPa.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

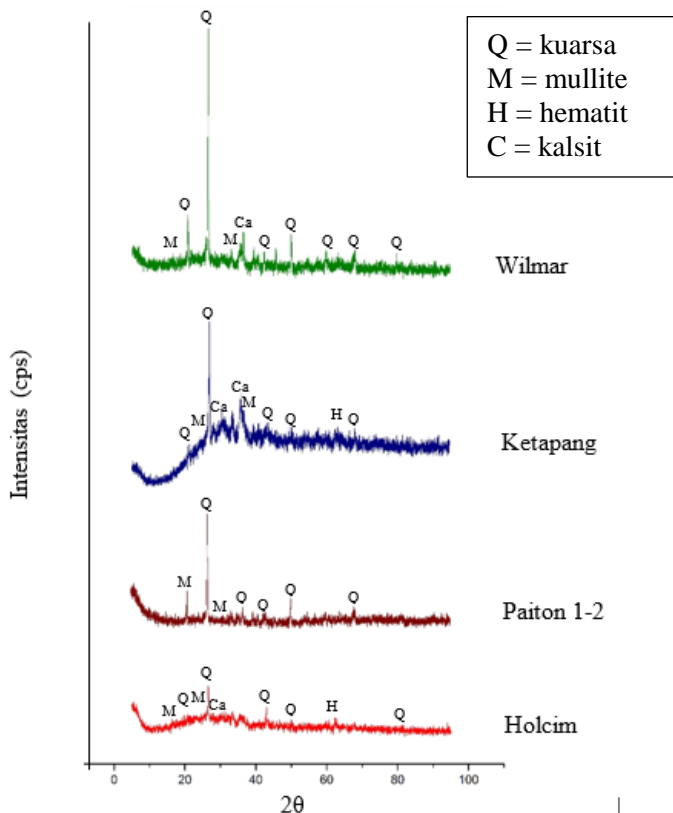
4.1 Komposisi Fasa Mineral dan Kekristalan

Komposisi fasa mineral dan kekristalan dari abu layang dianalisis menggunakan instrumen. Gambar 4.1 merupakan difraktogram abu layang dari PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang, dan Wilmar. Abu layang memiliki beberapa kandungan fasa yang dominan antara lain kuarsa, mullite, hematit, dan kalsit. Berdasarkan hasil analisis difraksi abu layang memiliki kandungan fasa amorf dan mineral utama kuarsa (Q) dan mullite (M) yang merupakan sumber utama silika dan alumina (Querol dkk., 2002). Mullite merupakan fasa yang terbentuk dari silika dengan alumina. Kedua komponen ini berperan aktif dalam pembentukan ikatan dalam geopolimer (Rommel dkk., 2014). Berbeda dengan abu layang Holcim dan Ketapang, pola difraksi abu layang PLTU Paiton 1-2 dan Wilmar didominasi oleh kuarsa.

Puncak-puncak tajam dan tinggi pada abu layang menunjukkan fasa kristalin yang tidak reaktif (Kusumawati dan Widiarti., 2015). Puncak-puncak tajam dan tinggi ini banyak muncul pada abu layang PLTU Ketapang dan Wilmar. Kristalinitas suatu material dapat dinilai dari intensitasnya. Semakin tinggi intensitas puncak, semakin tinggi fasa kristalin material tersebut (Fatmawati dan Fansuri., 2014). Fasa kristalin yang teridentifikasi pada abu layang yaitu kuarsa (SiO_2) yang muncul pada $2\theta = 26,60$; $26,49$; $26,69$; dan $26,65^\circ$ untuk masing-masing PLTU dari Holcim, Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar. Apabila dibandingkan dengan abu layang PLTU Ketapang dan Wilmar maka PLTU Holcim dan Paiton 1-2 memiliki fasa amorf yang lebih tinggi.

Kandungan fasa amorf yang besar ditandai dengan adanya *hump* (gundukan) yang besar pada difraktogram (Kusumawati dan Widiarti., 2015). Fasa amorf aluminosilikat yang tinggi dalam abu layang secara positif mempengaruhi proses geopolimerisasi, karena dapat dihidrolisis dalam larutan alkali (Rozeck dkk., 2018). Munculnya *hump* (gundukan) sebagai tanda fasa amorf pada abu

layang teridentifikasi pada $2\theta = 20-40^\circ$. Fasa amorf khususnya silika dan alumina sangat penting dalam proses geopolimerisasi. Hal ini berkaitan dengan kelarutan dan reaktifitas silika dan alumina karena tidak semua silika dan alumina dapat larut sempurna dalam larutan alkali. Hanya silika dan alumina berfasa amorf yang dapat larut dan membantu proses geopolimerisasi semakin cepat dan efektif (Xu dan Van Deventer., 2002). Oleh karena itu, abu layang dari PLTU Holcim dan Paiton 1-2 merupakan abu layang yang paling reaktif dan mudah mengalami pelarutan silika dan alumina dibandingkan dengan abu layang PLTU Ketapang dan Wilmar yang sangat kristalin. Adanya fasa kristalin yang sangat tinggi dari abu layang PLTU Kepatang dan Wilmar menyebabkan tidak adanya ikatan yang reaktif dari hasil kelarutan silika dan alumina dalam proses geopolimerisasi sehingga terjadi kegagalan dalam sintesis.



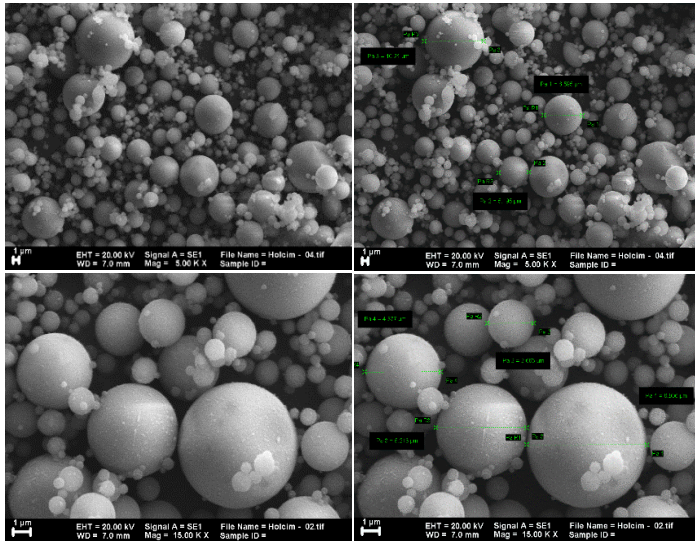
Gambar 4. 1 Difraktogram sinar-X abu layang dari PLTU A). Holcim, B). Paiton 1-2, C). Ketapang, dan D). Wilmar.

4.2 Morfologi Abu Layang

Morfologi dari abu layang dapat diketahui dengan menggunakan analisis SEM. Selain morfologi, analisis SEM juga dapat mengetahui distribusi dan ukuran partikel abu layang. Distribusi ukuran partikel abu layang memainkan peranan penting dalam sifat mekanik geopolimer. Pada umumnya bentuk morfologi dari abu layang adalah bola dengan ukuran partikel diperkirakan

antara 1-100 μ m. Ukuran yang berbeda-beda dan tersebar secara heterogen diakibatkan karena saat melewati daerah pembakaran (*burning zone*) pada pembangkit listrik setiap partikel batubara mengalami perubahan sifat kimia dan fisika yang berbeda-beda (Supriadi, 2017).

Ukuran dan bentuk dari partikel abu layang sangat mempengaruhi kereaktifan dalam proses geopolimerisasi. Semakin kecil dan tidak beraturan bentuk partikel dari abu layang, maka semakin reaktif (mudah larut dalam asam atau basa) dikarenakan luas permukaan bidang sentuh dengan pelarut yaitu larutan alkali (NaOH) sebagai larutan pengaktif basa semakin besar (Kusumawati dan Widiarti., 2015). Gambar 4.2 hingga Gambar 4.5 merupakan mikrograf dari hasil analisis abu layang menggunakan SEM. Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa abu layang yang berasal dari PLTU Holcim secara keseluruhan berbentuk bola dengan berbagai ukuran yang tersebar $\leq 10\mu$ m. Ukuran ini menandakan bahwa terdapat banyak partikel yang halus dalam abu layang tersebut. Kehalusan ini dapat mempengaruhi reaktivitas abu layang dan meningkatkan workability (Sari, 2018). Selain itu PLTU Holcim memiliki jarak antar partikel yang sangat pendek satu dengan yang lain sehingga mudah untuk membentuk ikatan dalam pasta geopolimer. Jarak yang terjadi antar partikel abu layang ini disebabkan oleh perbedaan diameter (Risdanareni dkk., 2017). Adanya hal ini mengakibatkan abu layang yang berasal dari PLTU Holcim memiliki kekuatan tekan yang paling baik diantara abu layang yang lain.

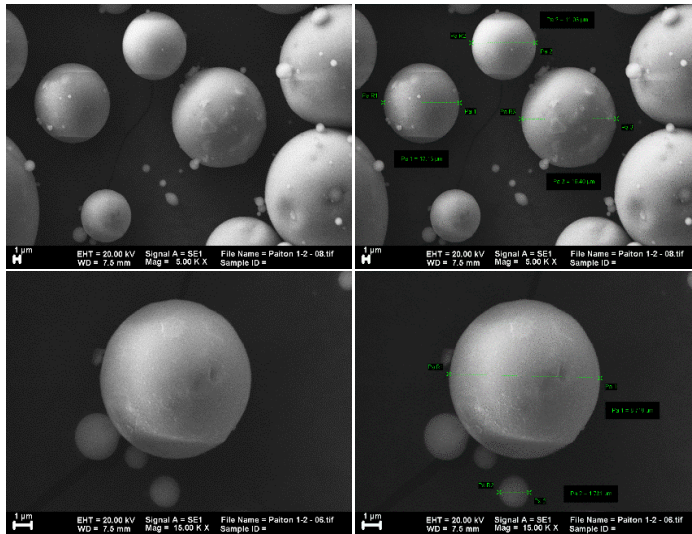


Gambar 4. 2 Mikrograf abu layang PLTU Holcim

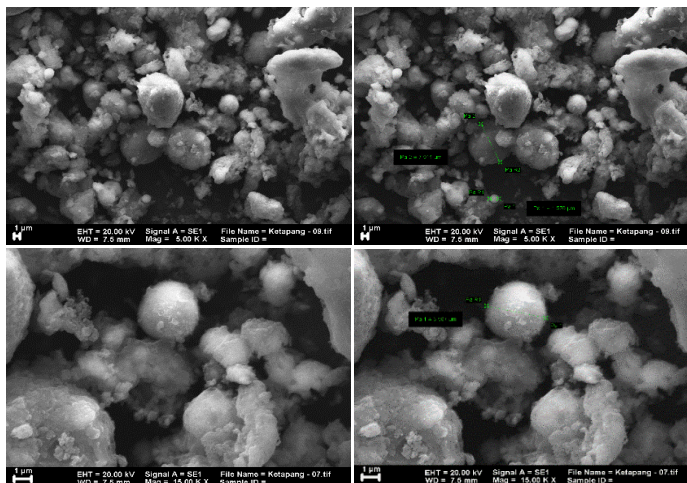
Gambar 4.3 adalah mikrograf abu layang yang berasal dari PLTU Paiton 1-2 dan terlihat bahwa partikel abu layang berbentuk bola dengan ukuran yang jauh lebih besar ($\geq 10\mu\text{m}$) dibandingkan dengan PLTU holcim. Ukuran partikel yang besar ini juga mengakibatkan adanya jarak antar partikel dan luas permukaan yang lebar. Sehingga dalam proses geopolimerisasi membutuhkan waktu yang lebih lama untuk terjadinya ikatan dalam pasta geopolimer.

Berbeda halnya dengan PLTU Holcim dan Paiton 1-2, abu layang yang berasal dari PLTU Ketapang dan Wilmar memiliki bentuk yang tidak beraturan. Gambar 4.4 adalah mikrograf abu layang yang berasal dari PLTU Ketapang, di mana terlihat sedikit sekali partikel yang berbentuk bola. Ukuran partikel yang sangat heterogen menyebabkan jarak antar partikel menjadi lebar dan kereaktifan menjadi rendah sehingga probabilitas untuk membentuk ikatan dalam pasta geopolimer juga sangat rendah. Kondisi yang sama terjadi juga pada PLTU Wilmar. Terlihat pada Gambar 4.5 bahwa abu layang PLTU Wilmar memiliki partikel

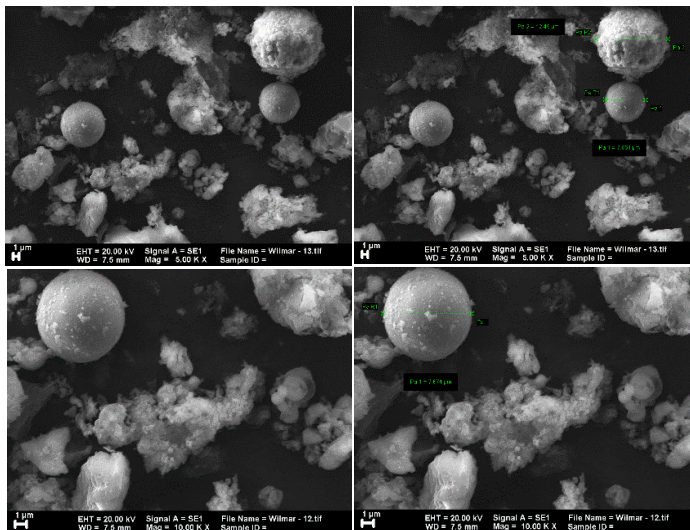
berbentuk bola sangat sedikit. Selain itu jarak antar partikel yang lebar akan mempengaruhi ikatan geopolimer menjadi rendah.



Gambar 4. 3 Mikrograf abu layang PLTU Paiton 1-2



Gambar 4. 4 Mikrograf abu layang PLTU Ketapang



Gambar 4. 5 Mikrograf abu layang PLTU Wilmar

4.3 Distribusi Ukuran Partikel

Distribusi ukuran partikel abu layang dapat diketahui menggunakan instrumen PSD (*Particle Size Distribution*). Bagian ini sangat penting karena distribusi ukuran partikel memiliki efek yang potensial pada ketahanan geopolimer, dengan memahami distribusi ukuran partikel dapat memprediksi dan mengendalikan kekuatan tekan. Ukuran partikel dapat menyebabkan laju reaksi geopolimerisasi yang berbeda. Hal ini diakibatkan oleh proses pelarutan ion Si dan Al diawal tahap karena reaksi geopolimerisasi dimulai pada permukaan partikel abu layang. Oleh karena itu distribusi ukuran partikel yang optimal tetap menjadi parameter penting dalam keseluruhan reaktivitas abu layang untuk sintesis geopolimer (Tennakon dkk., 2015). Hasil pengukuran ukuran partikel menggunakan PSD ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil pengukuran partikel abu layang

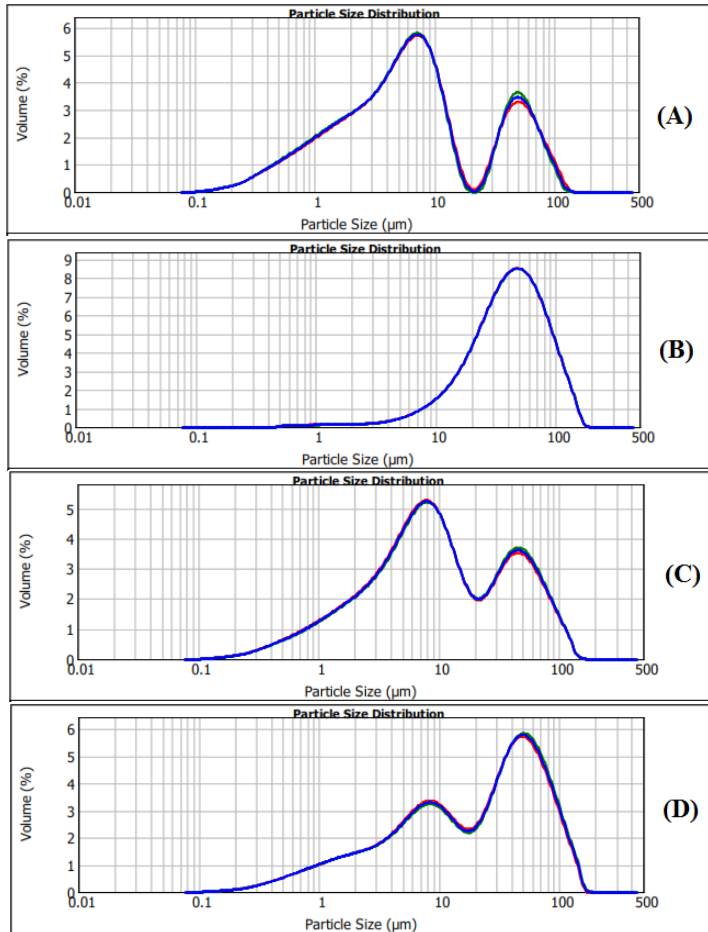
Ukuran (μm)	PLTU Holcim (%)	PLTU Paiton 1-2 (%)	PLTU Ketapang (%)	PLTU Wilmar (%)
0,50	4,06	00,00	2,19	1,78
1,00	11,00	0,43	6,35	5,28
2,00	21,99	1,01	13,82	10,92
2,50	26,36	1,23	17,09	13,11
3,00	30,29	1,44	20,18	15,07
5,00	44,19	2,45	31,70	22,02
10,00	68,91	6,48	54,15	36,00
12,18	74,11	8,73	59,96	39,91
15,00	77,28	11,99	64,74	43,44
25,00	78,44	25,90	72,19	51,64
36,00	81,52	42,26	78,65	61,31
45,00	85,88	54,26	83,76	69,21
56,00	90,79	66,36	88,84	77,46
71,00	95,36	78,52	93,58	85,79
80,00	97,08	83,83	95,50	89,41
100,00	99,19	91,82	98,18	94,82
140,00	100,00	98,75	99,95	99,41
160,00	100,00	99,83	100,00	99,98
180,00	100,00	100,00	100,00	100,00
200,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.2 abu layang yang berasal dari PLTU Holcim memiliki tingkat kehalusan yang lebih tinggi dibanding dengan abu layang PLTU Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar. Hal ini dapat dilihat ketika ukuran partikel yang lebih kecil dari 140 μm abu layang PLTU Holcim sudah mencapai 100%. Menurut Assi dkk., 2018 dan Hadi dkk., 2018 kehalusan partikel dapat meningkatkan luas permukaan sehingga terjadi ikatan antara komponen amorf abu layang dengan larutan alkali aktivator yang mempengaruhi laju dari geopolimerisasi. Abu layang dengan ukuran partikel halus dapat

membentuk zona transisi permukaan menjadi padat sehingga meningkatkan kekuatan ikat yang tinggi. Xiao dan Jiang., 2017 juga menyatakan bahwa partikel yang lebih halus memiliki tingkat kereaktifan yang lebih tinggi daripada partikel yang besar dan dapat meningkatkan kekuatan dari geopolimer. Selain itu abu layang yang lebih halus dapat mengurangi celah antara partikel dan pori-pori dalam sistem geopolimer (Nikbin dkk., 2016). Abu layang yang berasal dari PLTU Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar memiliki ukuran partikel yang besar. Penelitian yang telah dilakukan oleh Sari, 2018 menyatakan bahwa partikel abu layang yang besar dengan persentase yang tinggi, akan membuat abu layang sulit larut dengan sempurna dalam larutan aktivator alkali sehingga mempengaruhi kekuatan tekan geopolimer. Pada Tabel 4.2 juga dijelaskan jumlah diameter dari partikel abu layang. Ketika semakin banyak jumlah partikel abu layang yang memiliki diameter yang besar maka dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk bereaksi dan dihasilkan kekuatan tekan yang rendah. Abu layang yang memiliki diameter besar dengan jumlah yang sedikit adalah abu layang PLTU Holcim dan Ketapang. Dari data ini dapat diperkirakan bahwa abu layang PLTU Holcim dan Ketapang akan mudah dalam bereaksi. Di lain pihak abu layang PLTU Paiton dan Wilmar akan membutuhkan waktu lebih lama dalam bereaksi dikarenakan besarnya ukuran partikel.

Tabel 4. 2 Ukuran partikel abu layang (μm)

Sumber Abu Layang	Diameter			Luas permukaan (m^2/g)
	10% (d_{10})	50% (d_{50})	90% (d_{90})	
PLTU Holcim	0,92	5,92	54,02	0,71
PLTU Paiton 1-2	13,32	41,65	93,34	0,08
PLTU Ketapang	1,46	8,82	59,01	0,48
PLTU Wilmar	1,81	22,94	81,71	0,37



Gambar 4. 6 Distribusi ukuran partikel abu layang dari PLTU (A) Holcim, (B) Paiton 1-2, (C) Ketapang, dan (D) Wilmar

4.4 Kelarutan Si dan Al

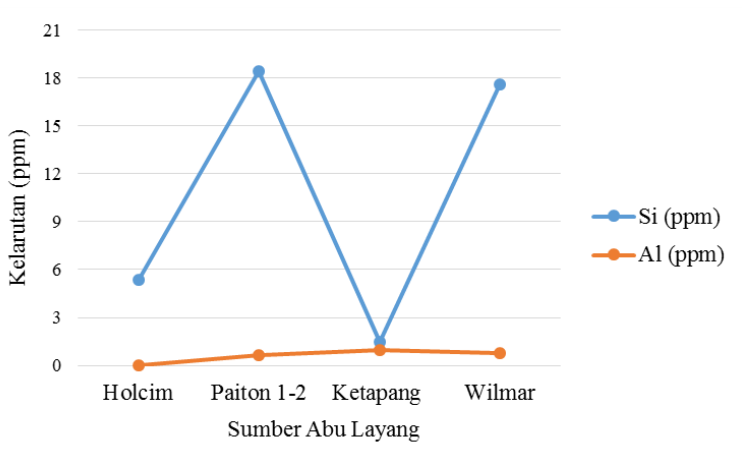
Abu layang dilarutkan dalam larutan NaOH 10M dan dibantu pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* selama 5 jam. Waktu kontak yang lama akan menyebabkan campuran menjadi

sangat lengket dengan formasi $[\text{Si}(\text{OH})_4]^{4-}$ dan $[\text{Al}(\text{OH})_4]^{5-}$ (Rattanasak dan Chindaprasirt., 2009). Hasil pengukuran kelarutan disajikan pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.7.

Tabel 4. 3 Hasil pengukuran uji kelarutan

No.	Nama Sampel	Si (ppm)	Al (ppm)
1.	Holcim	5,35	<MDL*
2.	Paiton 1-2	18,42	0,62
3.	Ketapang	1,49	0,97
4.	Wilmar	17,58	0,75

*MDL = Methods Detection Limit



Gambar 4. 7 Grafik Hasil Kelarutan Abu Layang PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar

Berdasarkan hasil dari uji kelarutan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa masing-masing abu layang memiliki tingkat kelarutan yang berbeda. Hal ini dikarenakan aluminium dan silika memiliki reaktivitas yang berbeda terhadap larutan alkali (NaOH). Abu layang dengan nilai kelarutan Si tertinggi ada pada abu layang PLTU Paiton 1-2 dan abu layang yang memiliki nilai kelarutan Al tertinggi yaitu abu layang PLTU

Ketapang. Hasil konsentrasi Al dari uji kelarutan lebih rendah dari Si, hal ini didukung dengan kandungan Al dan Si dalam abu layang. Kelarutan dari silika dan alumina dari abu layang sangat dipengaruhi oleh konsentrasi NaOH. Konsentrasi NaOH yang tinggi akan meningkatkan disosiasi spesies aktif dari abu layang. Namun, dengan penggunaan konsentrasi yang terlalu tinggi pula akan menyebabkan terganggunya proses geopolimerisasi karena banyaknya ion OH⁻ yang menyebabkan reaksi menjadi tidak efisien. Hasil dari uji kelarutan dapat menjadi parameter kemampuan abu layang bereaksi selama proses geopolimerisasi.

4.5 Komposisi Kimia Abu Layang

Komposisi kimia abu layang dapat diketahui dengan melakukan analisis menggunakan XRF (*X-Ray Fluorescence*). Persentase unsur-unsur penting (dilaporkan dalam bentuk oksidanya seperti SiO₂, Al₂O₃, CaO dan Fe₂O₃) dapat ditentukan dengan analisis XRF tersebut. Komponen oksida yang terkandung dalam abu layang sangat mempengaruhi hasil sintesis geopolimer. Selanjutnya, dari hasil analisis ini dapat menentukan kategori abu layang, apakah masuk ke dalam tipe F atau tipe C. Sesuai dengan ASTM C618 kategori abu layang tipe F apabila jumlah SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 70%. Kategori abu layang tipe C apabila jumlah SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ < 70%. Semua abu layang yang digunakan dalam penelitian ini masuk ke dalam tipe F pada Tabel 4.5. Abu layang dengan tipe F memiliki *self-hardening* yang baik sehingga mudah mengeras. Komposisi dari masing-masing abu layang menunjukkan hasil yang berbeda-beda. Perbedaan komposisi ini dipengaruhi oleh pembakaran batu bara dan komposisi kimia yang dimiliki batu bara. Sesuai dengan hasil dari kelarutan yang berbeda-beda pada masing-masing sumber abu layang karena komposisi Al₂O₃ dan SiO₂ yang berbeda (Mushlihah, 2008). Komposisi kimia dari abu layang disajikan pada Tabel 4.4 sedangkan penggolongannya sesuai dengan ASTM C618 disajikan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 4 Hasil analisa komposisi abu layang menggunakan XRF

No.	Senyawa	Kandungan (%)			
		PLTU Holcim	PLTU Paiton 1-2	PLTU Ketapang	PLTU Wilmar
1.	Na ₂ O	2,2500	1,1000	0,5090	0,2570
2.	MgO	7,3300	4,3000	5,4500	1,4200
3.	Al ₂ O ₃	20,3300	16,8800	19,4500	20,8000
4.	SiO ₂	42,1900	56,200	40,4200	51,0200
5.	P ₂ O ₅	0,2300	0,1400	0,8620	0,1970
6.	SO ₃	0,6580	0,1270	0,7620	0,3520
7.	K ₂ O	1,1000	0,9520	0,8790	0,6840
9.	CaO	13,0400	8,0100	9,3100	4,7000
10.	TiO ₂	1,4900	1,6500	1,8200	2,6700
12.	V ₂ O ₅	0,0289	0,0249	0,0411	0,0488
13.	Cr ₂ O ₃	0,0332	0,0545	0,0240	0,0573
14.	MnO	0,1430	0,0813	0,1410	0,1280
15.	Fe ₂ O ₃	10,4500	9,2900	13,4900	11,6400
16.	Co ₃ O ₄	0,0069	0,0052	0,0082	0,0056
17.	NiO	0,0106	0,0087	0,0125	0,0074
18.	CuO	0,0052	0,0042	0,0069	0,0070
19.	ZnO	0,0114	0,0054	0,0121	0,0087
20.	Ga ₂ O ₃	0,0033	0,0012	0,0030	0,0042
21.	Rb ₂ O	0,0066	0,0058	0,0058	0,0049
24.	SrO	0,1060	0,0524	0,0414	0,0486
25.	Y ₂ O ₃	0,0036	0,0031	0,0054	0,0050
26.	ZrO ₂	0,0294	0,0296	0,0267	0,0443
27.	Nb ₂ O ₅	0,0013	0,0001	0,0014	0,0023
28.	BaO	0,1520	0,0688	0,0786	0,0609
30.	CeO ₂	0,0068	0,0078	0,0117	0,0122
31.	Nd ₂ O ₃	0,0060	0,0058	0,0062	0,0041
35.	LOI	0,3700	0,9900	6,5900	5,7900

Tabel 4. 5 Klasifikasi tipe abu layang yang digunakan dalam pembuatan geopolimer berdasarkan data XRF

	PLTU Holcim	PLTU Paiton 1-2	PLTU Ketapang	PLTU Wilmar
SiO ₂ (%)	42,19	56,20	40,42	51,02
Al ₂ O ₃ (%)	20,33	16,88	19,45	20,80
Fe ₂ O ₃ (%)	10,45	9,29	13,49	11,64
Jumlah	72,97	82,37	73,36	83,46
Klasifikasi	Tipe F	Tipe F	Tipe F	Tipe F

Kandungan kimia abu layang, utamanya SiO₂, Al₂O₃, CaO, dan Fe₂O₃, diharapkan memberikan efek tertentu khususnya pada kuat tekan geopolimer. SiO₂ diperlukan untuk inisiasi pembentukan oligomer dan polikondensasi silikat yang dapat meningkatkan efisiensi geopolimerisasi (Panias dkk., 2007) sedangkan Al₂O₃ berperan dalam pembentukan awal inti geopolimer karena Al₂O₃ sebagai penghubung antar oligomer silikat yang akan membentuk struktur tiga dimensi. Secara umum, kandungan alumunium dalam bahan sumber silikat-alumina mengendalikan sejumlah besar sifat geopolimer termasuk stabilitas jaringan geopolimer yang mempengaruhi kekuatan tekan dan daya tahan (Tennakon dkk., 2015). Hasil komposisi kimia SiO₂ dan Al₂O₃ juga dapat memberikan perbandingan Si/Al yang dapat menafsirkan kuat tekan yang maksimal. Menurut Hadi, 2008 perbandingan SiO₂/Al₂O₃ \approx 2 dapat menghasilkan kuat tekan yang maksimum. Berdasarkan hasil perbandingan rasio SiO₂/Al₂O₃, abu layang yang memiliki nilai mendekati 2 yaitu abu layang yang berasal dari PLTU Holcim dan Ketapang dengan nilai 2,07, sedangkan abu layang PLTU Paiton 1-2 dan Wilmar masing-masing memiliki nilai 3,33 dan 2,45. Adanya nilai SiO₂/Al₂O₃ dapat menafsirkan bahwa abu layang yang berasal dari PLTU Holcim dan Ketapang dapat menghasilkan geopolimer yang memiliki kuat tekan yang tinggi dibanding abu layang PLTU Paiton 1-2 dan Wilmar.

Adanya kandungan CaO dalam abu layang dapat menyebabkan pasta geopolimer cepat mengeras. Tingginya CaO tidak hanya menyebabkan reaksi polimerisasi tapi juga reaksi hidrasi yang meningkatkan kuat tekan (Risdanareni dkk., 2017). Hidrasi abu layang yaitu pembentukan material geopolimer yang terjadi dari reaksi antara CaO bebas dengan Al_2O_3 , SiO_2 melibatkan air. Komposisi CaO dalam abu layang berpengaruh dalam pengerasan awal karena CaO dapat membentuk kalsium silikat yang amorf, seperti yang terdapat pada semen portland (OPC) (Antoni dkk., 2015). Komposisi CaO pada masing-masing abu layang dari PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar secara berurutan 13,04; 9,31; 8,01; dan 4,70%. Berdasarkan data komposisi CaO tersebut maka abu layang PLTU Holcim memiliki kemampuan pengerasan lebih cepat dibanding abu layang yang lain.

Kandungan lain yaitu Fe_2O_3 , Besi akan bereaksi dengan ion hidroksida yang terdapat dalam larutan basa untuk membentuk $Fe(OH)_3$. Namun disisi lain ion hidroksida ini sangat diperlukan untuk pelarutan silika dan alumina dari abu layang sehingga silika dan alumina terlarut yang diperlukan pada geopolimerisasi menjadi lebih sedikit (Mushlihah, 2008). Kandungan Fe_2O_3 untuk masing-masing PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar secara berurutan 10,45%; 9,29%; 13,49; dan 11,64%. Kandungan Fe_2O_3 dari abu layang PLTU Ketapang dan Wilmar lebih tinggi dibanding abu layang PLTU Holcim dan Paiton 1-2. Keadaan ini akan menghasilkan perbedaan pada hasil akhir geopolimer yaitu abu layang dari PLTU Ketapang dan Wilmar akan mengalami kekurangan ion hidroksida dalam pelarutan silika dan alumina sehingga menimbulkan geopolimer dengan hasil kuat tekan yang rendah. Selain itu hasil dari pengujian menggunakan instrumen XRF akan menghasilkan nilai LOI. Masing-masing abu layang dari abu layang PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang, dan Wilmar memiliki nilai LOI 0,37%; 0,99%; 6,59; dan 5,79%. Nilai LOI yang rendah menunjukkan kemampuan bioler pada PLTU sangat baik.

4.6 Sintesis Geopolimer

Sintesis geopolimer diawali dengan pembuatan larutan pengaktif basa. Penggunaan NaOH dalam reaksi bertujuan untuk melarutkan kandungan Si dan Al pada permukaan abu layang saat pembentukan gel dan mengikat partikel padat yang tidak larut dalam sistem geopolimer. Samantasinghar dan Singh., 2018 dan Fatmawati dan Fansuri., 2014 menyatakan bahwa ion hidroksida (OH^-) dalam larutan NaOH berperan mengaktifkan Si dan Al dari permukaan abu layang sehingga terbentuk monomer $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ sedangkan ion Na^+ berperan sebagai penyeimbang muatan (kation) pada matriks geopolimer. Monomer silikat dan aluminat tersebut akan saling bergabung membentuk rantai Si-O-Al dengan bantuan ion Na^+ .

Geopolimerisasi merupakan proses kompleks yang memiliki pelarutan sebagai tahap awal, biasanya menggunakan larutan NaOH dengan konsentrasi yang tinggi. Larutan NaOH yang digunakan dalam sintesis geopolimer menggunakan konsentrasi 14 M. Pelet NaOH dilarutkan dalam air terdemineralisasi dan didiamkan selama 24 jam hingga kembali ke suhu ruang karena menimbulkan panas dari reaksi eksotermis dan memastikan bahwa larutan NaOH telah larut sempurna. Konsentrasi NaOH memainkan peranan penting dalam pengembangan kuat tekan geopolimer karena proses geopolimerisasi membutuhkan alkali yang kuat untuk mengaktifkan Si dan Al dari abu layang (Hameed dkk., 2017). Selain larutan NaOH untuk membantu proses geopolimerisasi yang baik dibutuhkan penambahan silikat terlarut dalam fasa cair sehingga nilai SiO_2 dan Na_2O dapat masuk ke polikondensasi pada tahap awal (Panias dkk., 2007). Natrium silikat (Na_2SiO_3) juga dapat berperan sebagai *binder*/pengikat sumber aluminosilikat. Ion-ion silikat yang terkandung dalam Na_2SiO_3 sudah dalam bentuk oligomer yang siap berpolimerisasi dengan ion-ion silikat dan aluminat hasil kelarutan abu layang. Silikat yang larut dalam fasa cair dibutuhkan untuk inisiasi pembuatan oligomer dan selanjutnya untuk polikondensasi silikat atau oligomer aluminosilikat sehingga meningkatkan efisiensi

geopolimer. Semakin banyak natrium silikat yang ditambahkan maka semakin meningkat SiO_2 dalam fasa cair geopolimer yang akan menghasilkan rantai monosilikat, trimer dan siklis secara berangsur-angsur, kemudian membentuk struktur kompleks polimer tiga dimensi sehingga akan meningkatkan sifat mekanik (kuat tekan) geopolimer karena membentuk struktur mikro yang lebih homogen (Kaja dkk., 2018 dan Hadi, 2008). Selain itu kandungan silika pada larutan pengaktif basa sangat mempengaruhi perkembangan umur dini pada struktur geopolimer. Pencampuran larutan NaOH dengan Na_2SiO_3 untuk menjadi larutan aktivator/pengaktif akan menimbulkan panas kembali efek dari reaksi eksotermis. Sehingga harus ditunggu hingga keadaan kembali ke suhu ruang. Secara keseluruhan larutan pengaktif basa sangat penting dalam geopolimerisasi karena membantu melepaskan $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ kemudian molekul air dari hidrolisi menghubungkan tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ satu sama lain membentuk polimer, hingga polikondensasi membentuk jaringan aluminosilikat tiga dimensi (Hamidi dkk., 2016).

Metode yang digunakan dalam sintesis geopolimer yaitu metode non-impregnasi (langsung) dan impregnasi $\text{Al}(\text{OH})_3$. Pada dasarnya penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ ke dalam abu layang bertujuan untuk memperkaya spesi Al dalam abu layang dan memenuhi rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ pada sistem geopolimer (Salami dkk., 2018). $\text{Al}(\text{OH})_3$ juga turut larut dalam basa yang akan menambah aluminat reaktif sehingga lebih banyak monomer aluminat untuk dapat bereaksi dengan monomer silikat dan reaksi kondensasi lebih banyak terjadi. Namun, dengan penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang berlebih akan menyebabkan terjadinya penurunan kuat tekan karena terdapat sisa $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang tidak bereaksi dengan silikat, sehingga terjadi sisa SiO_2 yang tidak bereaksi (Anggoro dan Atmaja., 2010).

Abu layang yang disintesis memiliki warna dan tekstur masing-masing yang berbeda dikareakan hasil dari pembakaran batu bara pada Gambar 4.8 dan dijelaskan pada Tabel 4.6. Warna abu layang ini akan sama dengan warna hasil akhir dari

geopolimer. Tekstur yang berbeda antara satu sama lain dipengaruhi oleh ukuran partikel.



Gambar 4. 8 Hasil visual abu layang PLTU (A) Holcim, (B) Paiton 1-2, (C) Ketapang, dan (D) Wilmar

Pada penelitian ini digunakan dua metode yang berbeda untuk penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ ke dalam abu layang sebelum pencampuran dengan larutan pengaktif basa. metode non-impregnasi (langsung) dan impregnasi. Perbedaan metode ini dilakukan untuk mengetahui metode yang dapat menghasilkan kekuatan tekan geopolimer secara maksimal. Pada metode non-impregnasi (langsung) setelah penambahan suspensi $\text{Al}(\text{OH})_3$, langsung dicampur dengan larutan basa pengaktif. Sedangkan metode impregnasi yaitu abu layang yang telah diimpregnasi oleh

suspensi $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan dikeringkan baru ditambahkan dengan larutan pengaktif basa. Metode impregnasi diharapkan mampu memperbaiki metode sebelumnya karena persebaran Al_2O_3 yang bersumber dari $\text{Al}(\text{OH})_3$ diyakini telah merata. Serta abu layang telah teraktifasi dengan baik oleh spesi Al. Sehingga ikatan dalam matriks geopolimer dapat berikatan dengan sangat baik.

Tabel 4. 6 Penjelasan hasil visual abu layang PLTU (A) Holcim, (B) Paiton 1-2, (C) Ketapang, dan (D) Wilmar

No.	Abu Layang	Warna	Tekstur
1.	PLTU Holcim	Coklat muda	Halus seperti tepung
2.	PLTU Paiton 1-2	Abu-abu dan sedikit hitam	Butiran halus licin
3.	PLTU Ketapang	Coklat tua dan bintik putih	Halus seperti pasir
4.	PLTU Wilmar	Hitam	Halus seperti pasir



Gambar 4. 9 Proses pencetakan dan pemeraman pasta geopolimer dalam cetakan silinder dengan dengan abu layang (A) Paiton 1-2, (B) Holcim

Abu layang, baik yang dibuat dengan impregnasi maupun non impregnasi, setelah dicampur dengan larutan pengaktif basa itu dituang ke dalam cetakan silinder dengan perbandingan 1:2 untuk

diameter:tinggi seperti pada Gambar 4.8. Cetakan digetarkan untuk mengurangi gelembung udara dalam pasta geopolimer yang akan menciptakan pori-pori dan menyebabkan rendahnya nilai kuat tekan. Geopolimer dibiarkan dalam suhu ruang hingga mengeras. Setiap geopolimer memiliki waktu yang berbeda-beda tergantung pada karakteristik abu layang. Berdasarkan komposisi resep yang digunakan hanya ada dua sumber abu layang yang dapat disintesis hingga membentuk geopolimer, yaitu abu layang PLTU Holcim dan Paiton 1-2.

Sifat-sifat fisik pasta geopolimer yang dihasilkan dari proses pencampuran dapat dilihat pada Tabel 4.7 sedangkan bentuk dari geopolimer yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.10 sampai 4.12.

Tabel 4. 7 Hasil pengamatan sintesis geopolimer

No.	Abu Layang	Keterangan
1.	Holcim	Encer, mudah dicetak
2.	Paiton 1-2	Kental, mudah dicetak
3.	Ketapang	Tidak dapat dicetak
4.	Wilmar	Tidak dapat dicetak

Gambar 4.10 dan 4.11 menunjukkan hasil visual dari geopolimer yang bersumber dari PLTU Paiton 1-2. Hasil menunjukkan bahwa terdapat tiga lapisan. Sesuai dengan warna abu layang PLTU Paiton 1-2 yang berwarna abu-abu. Lapisan tengah berwarna hitam yang diindikasikan sebagai kandungan karbon pada abu layang dan berwujud gel tidak bisa mengeras ataupun menempel pada geopolimer (mudah lepas) yang memiliki tinggi 1 cm. Kandungan karbon akan memberikan alkalinitas rendah sehingga menghasilkan ikatan yang rendah dalam matriks (Koshy dkk., 2019). Gel ini harus dihilangkan apabila ingin memaksimalkan kekuatan tekan geopolimer karena tidak dapat membuat geopolimer pecah sempurna saat proses kekuatan tekan. Perbedaan metode yang digunakan tidak membedakan hasil visual dari geopolimer seperti yang terlihat pada Gambar 4.10.

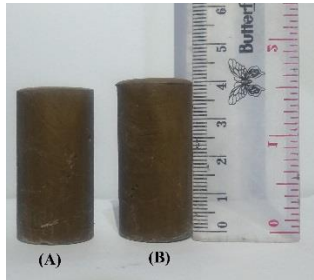
Banyaknya kandungan karbon pada geopolimer apabila dipanaskan saat *temperature curing* dapat menghasilkan pori-pori yang akan menyebabkan hasil kekuatan tekan menjadi rendah. Geopolimer yang berasal dari abu layang PLTU Holcim tampak seperti pada gambar 4.12. Geopolimer tersebut berwarna coklat sama seperti warna abu layang PLTU Holcim dan tidak terdapat lapisan lain seperti pada geopolimer Paiton 1-2.



Gambar 4. 10 Foto Geopolimer dari abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan metode non-impregnasi (langsung)

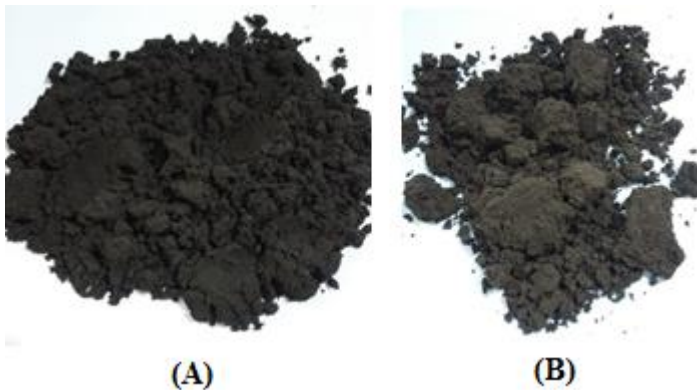


Gambar 4. 11 Foto Geopolimer abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan metode impregnasi



Gambar 4. 12 Foto Geopolimer berasal dari abu layang PLTU Holcim (A). non-impregnasi (langsung) (B) impregnasi

Abu layang PLTU Ketapang dan Wilmar gagal di sintesis geopolimer karena karakteristik abu layang yang kurang reaktif dengan resep yang digunakan, karena tidak dapat membentuk pasta geopolimer seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Foto geopolimer abu layang PLTU (A) Ketapang dan (B) Wilmar yang tidak berhasil menjadi pasta geopolimer dengan resep dan metode yang sama.

Geopolimer yang telah berhasil disintesis kemudian dikeluarkan dari cetakan dan dimasukkan ke dalam kantong plastik klip agar menghindari hilangnya air melalui penguapan yang

dapat menyebabkan keretakan pada geopolimer selama proses *temperature curing* pada suhu 55 °C selama 24 jam setelah itu sampel geopolimer dibiarkan pada suhu ruang untuk dilakukan variasi umur 7, 14, dan 28 hari yang kemudian diukur kekuatan tekan dari masing-masing geopolimer yang bersumber dari berbagai PLTU.

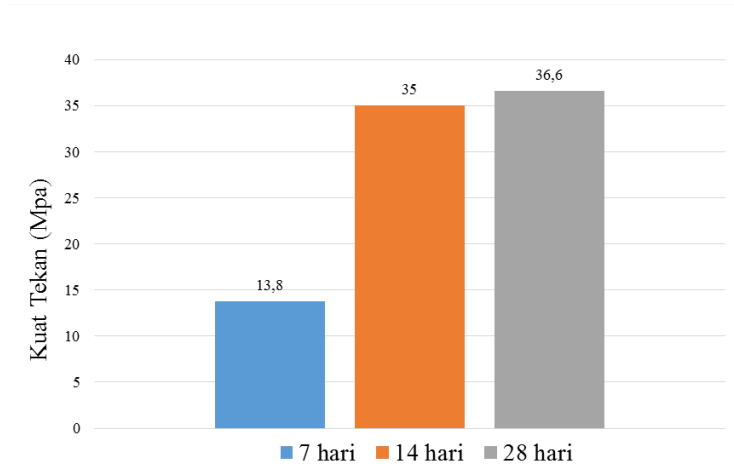
4.7 Kekuatan Tekan

Geopolimer dengan umur 7, 14, dan 28 hari akan diuji kualitasnya. Kualitas geopolimer dapat ditentukan dari sifat mekanik yaitu kuat tekan dengan menggunakan alat pengujian *Universal Testing Machine* di Laboratorium Beton Teknik Infrastruktur ITS. Pengaruh umur geopolimer terhadap hasil kuat tekan yaitu semakin lama umur geopolimer diharapkan semakin meningkat nilai kuat tekan karena pembentukan rantai C-A-S-H (Calcium-aluminosilikat-hidrat) dalam geopolimer semakin panjang (Mushlihah, 2008). Pengukuran kuat tekan dihentikan hingga umur 28 hari karena pada 28 hari kuat tekan geopolimer tidak menunjukkan hasil yang signifikan (Hardjito dkk., 2004). Data yang diperoleh dari kuat tekan berupa masa beban yang dapat ditanggung oleh sebuah geopolimer dengan satuan Mpa. Sebelumnya geopolimer disiapkan dengan meratakan permukaan atas dan bawah seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.14 agar seimbang antara sampel geopolimer dan alat kuat tekan (Nugroho, 2018). Geopolimer diberi tekanan perlahan-lahan sehingga mengalami keretakan dan pecah. Kuat tekan pada sampel yang pecah inilah yang dilaporkan sebagai hasil kekuatan tekan. Berdasarkan SNI 03-0349 tahun 1989, produksi beton mempunyai standar uji kuat tekan sebesar 9,8 MPa (Badan Standardisasi Nasional, 1989)

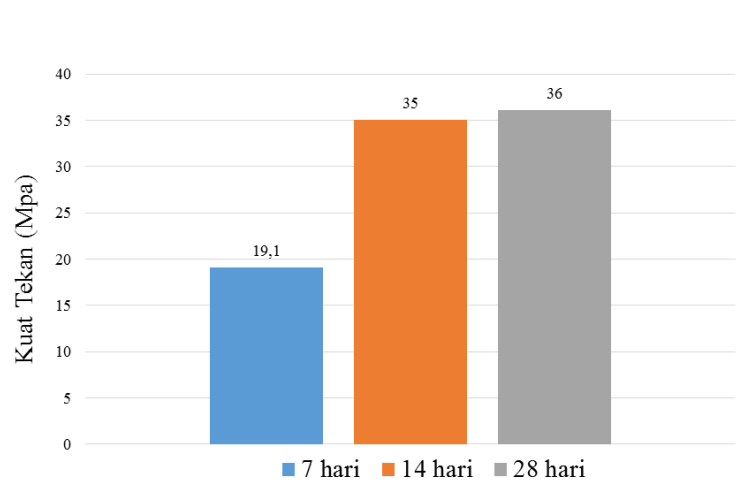


Gambar 4. 14 Foto geopolimer yang telah diratakan permukaan atas dan bawah.

Gambar 4.15 dan 4.16 merupakan hasil pengujian kekuatan tekan dari abu layang PLTU Holcim yang memiliki kekuatan tekan awal cukup tinggi (metode non-impregnasi dan impregnasi) dikarenakan adanya kandungan CaO yang cukup tinggi. Komposisi CaO yang cukup tinggi menyebabkan geopolimer memiliki kekuatan tekan awal yang tinggi namun untuk perkembangan umur selanjutnya tidak terlihat secara signifikan. Hal ini terlihat dari perkembangan umur geopolimer dari 14 hari ke 28 hari yang tidak menghasilkan kekuatan tekan yang signifikan. Komposisi CaO yang terlalu tinggi pada abu layang juga dapat mengurangi kekuatan tekan karena akan terjadi *flash set* pada geopolimer. Hasil kekuatan tekan dengan perbedaan metode non-impregnasi dan impregnasi tidak terlihat adanya perbedaan yang signifikan. Sehingga untuk geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Holcim perlakuan perbedaan metode yang diberikan tidak berpengaruh kepada perbaikan kekuatan tekan.

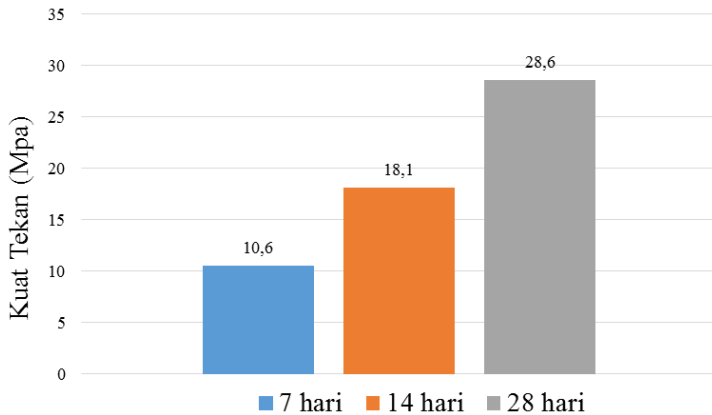


Gambar 4. 15 Kuat tekan geopolimer abu layang PLTU Holcim dengan Metode non-impregnasi

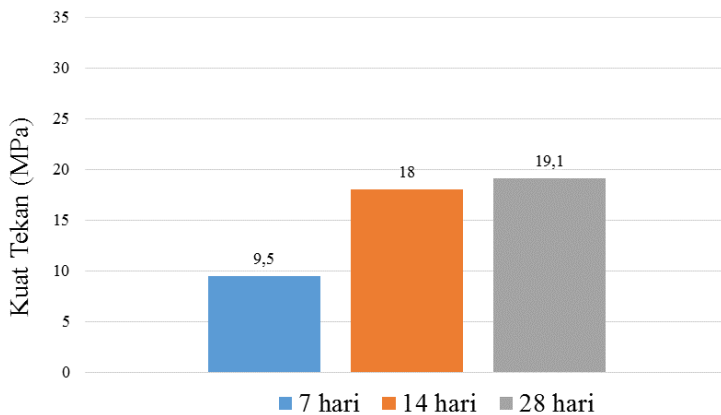


Gambar 4. 16 Kuat tekan geopolimer abu layang PLTU Holcim dengan Metode Impregnasi

Gambar 4.17 dan 4.18 merupakan hasil kekuatan tekan geopolimer abu layang PLTU Paiton 1-2 dari umur 7 hari hingga 28 hari. Terlihat bahwa semakin lama umur geopolimer maka kekuatan tekan juga semakin meningkat. Perlakuan metode non-impregnasi (langsung) sangat berpengaruh pada hasil kekuatan tekan karena terlihat adanya peningkatan yang signifikan dari umur ke umur. Sedangkan untuk metode impregnasi hasil kekuatan tekan dari umur 14 hari ke 28 hari terjadi peningkatan yang rendah. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kekuatan tekan. Berdasarkan penelitian ini dengan penggunaan resep yang sama maka kemungkinan besar dikarenakan kandungan dari berbagai sumber abu layang yang digunakan. Setiap abu layang memiliki kandungan yang berbeda-beda dan tidak semua abu layang menghasilkan reaksi yang sama. Faktor lain selain sumber abu layang yaitu waktu *curing* dan proses pengamplasan. Hasil kekuatan tekan geopolimer abu layang PLTU Paiton 1-2 tidak setinggi PLTU Holcim dikarenakan kandungan CaO yang rendah. Selain itu hasil dari pencetakan geopolimer ke dalam cetakan membuat permukaan menjadi tidak rata. Sehingga perlu pengamplasan agar permukaan menjadi rata dan sesuai dengan tinggi yang diharapkan untuk menghasilkan kekuatan tekan yang maksimal.



Gambar 4. 17 Kuat tekan geopolimer abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan Metode non-impregnasi



Gambar 4. 18 Kuat tekan geopolimer abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan Metode impregnasi

4.8 Pengujian pH

Pengujian pH pada penelitian ini digunakan sebagai parameter penting untuk menunjukkan tingkat alkalinitas suatu geopolimer dalam kondisi yang berbeda. Mengetahui nilai pH geopolimer menjadi sangat penting karena berhubungan dengan karbonasi geopolimer, korosi terhadap baja tulangan dan terjadinya serangan asam. Pengujian pH dilakukan pada setiap umur geopolimer yang telah dijabarkan pada Tabel 4.8. Metode pengujian pH dilakukan sesuai dengan standar ASTM 1067-02. Menurut (Behnood dkk., 2016) pH geopolimer berada diantara nilai 12,5-13. Setiap umur geopolimer memiliki nilai masing-masing. Adanya kenaikan atau penurunan dari nilai pH dikarenakan mekanisme yang terjadi dalam geopolimer. Penurunan pH dikarenakan kerusakan mekanisme seperti masuknya klorida, karbonasi atau serangan asam. Karbonasi merupakan kejadian dimana kalsium hidroksida [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] dalam matriks berubah menjadi CaCO_3 karena terjadi difusi dengan CO_2 . Hal ini mengurangi pH geopolimer bahkan sampai dapat menyentuh nilai 9 sedangkan peningkatan nilai pH dikarenakan terjadinya pelepasan lebih banyak alkali yang diikuti oleh pembubaran lebih lanjut fase trikalsium aluminat (C_3A) dan menghasilkan presipitasi *ettringite*. Selain itu nilai pH meningkat dari waktu ke waktu karena hidrasi lanjutan yang menghasilkan pelepasan jumlah alkali yang hampir konstan dalam larutan.

Menurut Tabel 4.8 nilai pH geopolimer yang dihasilkan memenuhi standar ($\text{pH} = 12,5-13$) yaitu dengan perlakuan metode impregnasi untuk masing-masing geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Holcim dan Paiton 1-2. Menurut (Behnood dkk., 2016) rata-rata 30 hari terakhir pengujian pH geopolimer berada pada kisaran 12,8-12,9. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian pH pada geopolimer berbahan abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan metode impregnasi.

Tabel 4. 8 Nilai pH pada setiap umur geopolimer

Umur Geopolimer	PLTU Holcim		PLTU Paiton 1-2	
	Metode I	Metode II	Metode I	Metode II
7 hari	12,48	12,55	12,55	12,85
14 hari	12,42	12,56	12,70	12,88
28 hari	12,44	12,55	12,17	12,86
Rata-rata	12,45	12,55	12,47	12,86

4.9 Pengujian Jarum Vicat

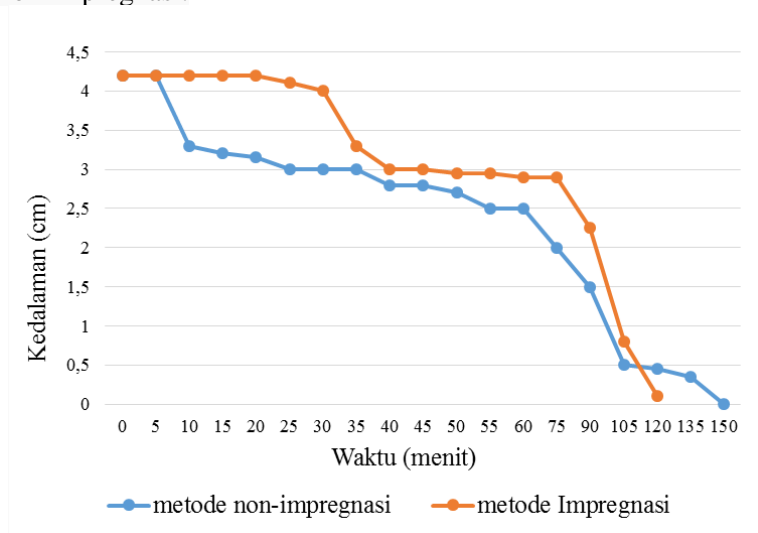
Metode ini dilakukan dengan prosedur yang sederhana untuk mendapatkan hasil yang memuaskan selama hidrasi abu layang pada geopolimer. Pengujian dengan jarum vicat ditampilkan pada Tabel 4.9 serta Gambar 4.19 dan 4.20 yang dilakukan dalam selang waktu tertentu dari awal pembuatan hingga campuran mengeras. Hidrasi abu layang adalah pembentukan material geopolimer yang terjadi dari reaksi antara CaO bebas dengan Al_2O_3 dan SiO_2 yang melibatkan air (Irani, 2009). Hidrasi abu layang akan menghasilkan ikatan C-A-S-H, C-S-H dan $Ca(OH)_2$. Senyawa SiO_2 (silika amorf reaktif) akan selalu berikatan dengan CaO, baik sebagai $3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S) ataupun $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S). Senyawa $3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S) dan $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S) apabila berikatan dengan air akan cepat bereaksi menjadi ikatan C-S-H. CaO yang berikatan dengan air akan menghasilkan $Ca(OH)_2$ dan panas. Panas yang dihasilkan dari proses eksotermis antara kalsium dan air akan mempercepat pengerasan dan kekuatan tekan diawal umur geopolimer. C-S-H ini berupa gel yang akan terus terbentuk selama reaksi hidrasi dan akan mengisi pori diantara air dan abu layang yang belum terhidrasi. Sehingga pori-pori menjadi minimum (Chindaprasirt dkk., 2018; Bayuseno dkk., 2010; Purnawan dan Prabowo., 2017; dan Darmawan dkk., 2008).

Tabel 4. 9 *Final setting time* abu layang PLTU Holcim dan Paiton 1-2

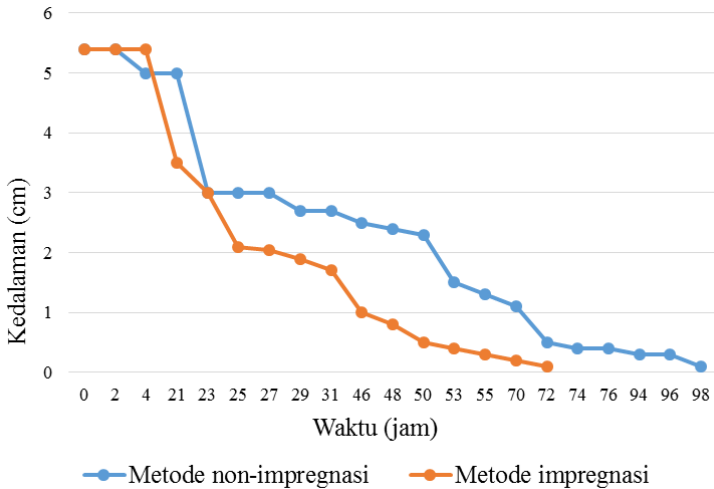
Waktu (menit)	PLTU Holcim		Waktu (jam)	PLTU Paiton 1-2	
	Metode I (cm)	Metode II (cm)		Metode I (cm)	Metode II (cm)
0	4,20	4,20	0	5,40	5,40
5	4,20	4,20	2	5,40	5,40
10	3,30	4,20	4	5,00	5,40
15	3,20	4,20	21	5,00	3,50
20	3,15	4,20	23	3,00	3,00
25	3,00	4,10	25	3,00	2,10
30	3,00	4,00	27	3,00	2,05
35	3,00	3,30	29	2,70	1,90
40	2,80	3,00	31	2,70	1,70
45	2,80	3,00	46	2,50	1,00
50	2,70	2,95	48	2,40	0,80
55	2,50	2,95	50	2,30	0,50
60	2,50	2,90	53	1,50	0,40
75	2,00	2,90	55	1,30	0,30
90	1,50	0,80	70	1,10	0,20
105	0,50	0,10	72	0,50	0,10
120	0,45		74	0,40	
135	0,35		76	0,40	
150	0,10		94	0,30	
			96	0,30	
			98	0,10	

Terlihat pada Tabel 4.9 bahwa geopolimer dari abu layang PLTU Holcim memiliki *final setting time* lebih cepat dibanding geopolimer abu layang PLTU Paiton 1-2. Geopolimer dari abu layang PLTU Holcim hanya membutuhkan waktu 2 hingga 2,5 jam untuk memiliki kedalaman 1mm yang selanjutnya siap untuk dilakukan *temperature curing*. Hal ini dikarenakan adanya kandungan kalsium yang tinggi pada abu layang sehingga

mendukung proses pengerasan. Ion kalsium berkontribusi pada pengendapan produk yang lebih cepat dan menghasilkan struktur mikro yang lebih padat dan kekuatan tekan yang tinggi (Kaja dkk., 2018). Sedangkan geopolimer dari abu layang PLTU Paiton 1-2 membutuhkan waktu 3 hingga 4 hari. Perbedaan metode juga mempengaruhi kecepatan pengerasan dari geopolimer. Geopolimer yang dibuat menggunakan metode impregnasi memiliki kelebihan yaitu *final setting time* yang lebih cepat dibanding dengan metode non-impregnasi.



Gambar 4. 19 *Setting Time* dari abu layang PLTU Holcim dengan metode non-impregnasi dan impregnasi.



Gambar 4. 20 *Setting Time* dari abu layang PLTU Paiton 1-2 dengan metode non-impregnasi dan impregnasi

Setting time geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Holcim dilakukan dengan dua metode yang berbeda dan menghasilkan hasil yang berbeda. Berdasarkan Gambar 4.19 metode non-impregnasi memiliki pengerasan diawal yang lebih cepat dan pengerasan diakhir yang lebih lambat dibanding metode impregnasi. Terlihat pada Gambar 4.19 metode impregnasi setelah waktu 30 menit mulai terjadi penurunan kedalaman dengan cepat dikarenakan pada waktu tersebut jarum vicat sudah membekas pada geopolimer. Sesuai dengan ASTM C881/C881M-14 bahwa *initial setting* pada geopolimer terjadi pada awal 30 menit. Sedangkan untuk metode non-impregnasi geopolimer mengeras secara perlahan-lahan diawal waktu *setting*. Setelah 20 menit geopolimer mulai terjadi penurunan kedalaman secara terus-menerus dan melambat pada akhir waktu. Hal yang sama juga terjadi pada geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU paiton 1-2.

Geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Paiton 1-2 memiliki lapisan hitam bertekstur gel yang harus dihilangkan untuk memaksimalkan kekuatan tekan. Gel ini mulai dapat dihilangkan setelah masuk hari ke-2. Pada metode non-impregnasi terlihat adanya penurunan kedalaman yang tajam dari 4 jam menuju 21 jam dan untuk metode impregnasi dari 21 jam ke 23 jam dikarenakan adanya penghilangan gel. Setelah menghilangkan gel hitam yang di indikasikan sebagai karbon, maka pengerasan yang terjadi akan semakin cepat. Terlihat pada Gambar 4.20 untuk metode non-impregnasi mulai terjadi pengerasan setelah 72 jam dan metode impregnasi pada 48 jam. Hal ini dapat terjadi karena pada metode impregnasi abu layang telah teraktifasi dengan baik oleh spesi Al sehingga ikatan dalam matriks menjadi lebih baik dibanding metode non-impregnasi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah disintesis geopolimer berbahan dasar abu layang yang berasal dari PLTU Holcim, Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar. Abu layang yang dapat menghasilkan geopolimer dengan kekuatan tekan sesuai SNI 03-0349 tahun 1989 dengan nilai minimum 9,8 MPa yaitu PLTU Holcim dan Paiton 1-2. Berdasarkan hasil kekuatan tekan semakin lama umur geopolimer maka kekuatan tekan juga meningkat. Hasil kekuatan tekan geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Holcim memiliki kekuatan tekan sebesar 13,8; 34,8; dan 36,6 MPa untuk masing-masing umur 7, 14, dan 28 hari pada metode non-impregnasi. Pada metode impregnasi kekuatan tekan yang dihasilkan sebesar 19,1; 35; 36 MPa untuk masing-masing umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil kekuatan tekan geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Paiton 1-2 memiliki kekuatan tekan sebesar 10,6; 18,1; dan 28,6 MPa untuk masing-masing 7, 14, dan 28 hari pada metode non-impregnasi. Pada metode impregnasi kekuatan tekan yang dihasilkan sebesar 9,5; 18; dan 19,1 MPa untuk masing-masing umur 7, 14, dan 28 hari. Terlihat dari hasil kekuatan tekan, perbedaan metode tidak menunjukkan selisih nilai yang signifikan. Perbedaan hasil kekuatan tekan antara geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Holcim dan Paiton 1-2 diakibatkan oleh beberapa faktor yaitu keberadaan fasa Si dan Al dalam fasa amorf, kehalusan, bentuk partikel, dan keberadaan komposisi senyawa oksida khususnya CaO dalam abu layang. Semakin tinggi kadar CaO maka kemampuan geopolimer mengeras akan semakin cepat. Metode impregnasi memiliki laju *setting time* yang lebih cepat dibanding non-impregnasi dikarenakan abu layang telah teraktivasi oleh spesi Al sehingga ikatan lebih cepat terbentuk.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M.M., Hussin,K., Bnhussain,M., Ismail, K.N., dan Ibrahim,W.M. (2011). Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement: A Review. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 6(1), 35-44.
- Anggoro, W., dan Atmaja, L. (2010). *Amobilisasi Logam Berat Pb pada Sintesis Geopolimer dari Abu Layang Semen Gresik*. Surabaya: Departemen Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Antoni., Gunawan, R., dan Hardjito, D. (2015). Rapid Indicators in Detecting Variation of Fly Ash for Making HVFA Concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 815, 153-157. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.815.153
- Assi, L., Deaver, E.E., dan Ziehl,P. (2018). Effect of Source and Particle Size Distribution on the Mechanical and Microstructural Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 167, 372-380. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.193
- ASTM C 618 (2005) *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan For Use as Mineral Mixture in Portland Cement Concrete*. American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, Volume 04.02.
- ASTM D 1067-02. *Standars Test Methods for Acidity or Alkalinity of Water.*, American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards, Washington, DC. Volume 11.01, 11.02, dan 15.05
- ASTM C 881/C881M-02. *Standard Spesification for Epoxy-Resin-Base Bonding System for Concrete*. American Society for

Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Volume 08.02

Atmaja, L., Fansuri, H., Maharani, A. (2011). Crystalline Phase Reactivity in The Synthesis of Fly Ash-Based Geopolymer. *Indonesian Journal of Chemistry*, 11(1), 90-95.

Badan Standardisasi Nasional (1989) SNI 03-0349:1989. *Bata Beton untuk Pasangan Dinding*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

Bayuseno, A.P., Widyanto, S.A., dan Juwantonono. (2010). Sintesis Semen Geopolimer Berbahan Dasar Abu Vulkanik dari Erupsi Gunung Merapi. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(4), 10-16.

Beckhoff, B., Kanggieber, B., Langhoff, N., Wedell, R., dan Wolff, H. (2006). *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*. Berlin: Springer.

Behnood, A., Titteboom, K.V., dan Belie, N.D. (2016). Methods for Measuring pH in Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, 105, 176-188. doi:dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.032

Chindaprasirt, P., Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Horpibulsuk, S., Poowancum, A., dan Injorhor, B. (2018). Effect of Calcium-rich Compounds on Setting Time and Strength Development of Alkali-Activated Fly Ash Cured at Ambient Temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 1-8. doi:doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00198

Darmawan, A., Anggraini, D., dan Gunawan. (2008). Pengaruh Substitusi Semen oleh Silika Abu Sekam Padi terhadap Kuat Tekan dan Suhu Reaksi Semen Portland. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 11(1), 15-19.

Davidovits, J. 1989. Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of Thermal Analysis*, 35(2), 429-441.

- Davidovits, J. 1991. Geopolymers. *journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymer System, Terminology. In: *Proceedings Second International Conference of Geopolymer '99* (hal. 9-39). Saint-Quentin: Institut Geopolymere.
- Dipohusodo, I. (1996). *Manajemen Proyek dan Kontruksi* (I ed.). Yogyakarta: Kanisius.
- Ehsan, K.M., Hossain, Md.R., Manzur, T., Shihag, A., dan Tabassum, N. (2016). *Particle Size Analysis by Image Processing Technique*. Dhaka: Departement of Engineering and Technology.
- Fansuri, H., Swastika, N., & Atmaja, L. (2008). Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton. *Akta Kimindo*, 3, 61-66.
- Fatmawati, A., dan Fansuri, H. (2014). Amobilisasi Kation Logam Berat Cr³⁺ pada Geopolimer Berbahan Baku Abu Layang PT. IPMOMI. *Jurnal Sains POMITS*, 1(1), 1-8.
- Guo, X., Zhang, L., Huang, J., dan Shi, H. (2017). Detoxification and Solidification of Heavy Metal of Chromium using Fly Ash-based Geopolymer with Chemical Agents. *Construction and Building Materials*. 151, 394-404.
- Grubb, J.A., Limaye, H.S., dan Kakade, A.M. (2007). Testing pH on Concrete. *Concrete International*, 78-83.
- Hadi, M. (2008). *Geopolimer Berbahan Dasar Campuran Abu Layang PT. Semen Gresik di Tuban, PLTU Cilacap dan PLTU Asam-Asam*. Surabaya: Departemen Kimia Fakultas Sains Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Hadi, M., Al-Azzawi, M., dan Yu, T. (2018). Effects of Fly Ash Characteristic and Alkaline Activator Components on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. *Construction and Building Materials*, 175, 41-54. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.092
- Hameed, A.M., Rawdhan, R.R., dan Al-Mishhadani, S.A. (2017). Effect of Various Factors on the Manufacturing of Geopolymer Mortar. *Archives of Science*, 1(3), 1-8.
- Hamidi, R.M., Man, Z., dan Azizli, K.A. (2016). Concentration of NaOH and the Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer. *4th International Conference on process Engineering and Advanced Materials*. 148, hal. 189-193. Kuala Lumpur: Elsevier. doi:doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.568
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajowo, M.J., dan Rangan, B.V. (2004). Factors Influencing The Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymers Concrete. *Dimensi Teknik Sipil*, 6(2), 88-93.
- Heitland, P. R.-R. (1999). *New Application for Nonmetals Determination by ICP-AES*. Germany: Spectro Application Report.
- Irani, K. (2009). *Modifikasi Permukaan Abu Layang Menggunakan NaOH dan Aplikasinya untuk Geopolimer: Sifat Fisik dan Mekanik*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- James, P.M.S. (1991). *Prinsiples, Methods and Application of Particle Size Analysis*. Cambridges: Cambridge University Press.
- Johan, A. (2009). karakterisasi Sifat Fisik dan Mekanik Bahan Refraktori α -Al₂O₃ Pengaruh Penambahan TiO₂. *Jurnal Penelitian Sains*, 12(2B), 1-8.

- Kaja, A.M., Lazaro, A., dan Yu, Q.L. (2018). Effect of Portland Cement on Activation Mechanism of Class F Fly Ash Geopolymer Cured Under Ambient Conditions. *Construction and Building Materials*, 189, 1113-1123. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.065
- Kanade, K.G., Kale, B.B., Aiyer R.C., dan Das, D.K. (2006). Effects of Solvents on The Synthesis of Nano-Size Zinc Oxide and Its Properties. *Materials Research Bulletin.*, 41, 590-600.
- Kim, E. H. (2012). *Understanding Effects of Silicon/Alumunium Ratio and Calcium Hydroxide on Chemical, Composition, Nanostructure and Compressive Strength for Metakaolin Geopolymers*. Urbana, Illinois: Civil Engineering, Univesity of Illinois.
- Koshy, N., Dondrob, K., Hu, L., Wen, Q., dan Meegoda, J.N. (2019). Synthesis and Characterization of Geopolymers Derived from Coal Gangue, Fly Ash and Red Mud. *Construction and Building Materials*, 206, 287-296. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.076
- Kriswarini, R., Anggraini, D., dan Djamaludin, A. (2010). Validasi Metoda XRF (XRay Fluorescence) Secara Tunggal dan Simultan untuk Analisis Unsur mg, Mn, dan Fe dalam Paduan Alumunium. *Prosiding Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir*. Yogyakarta.
- Kusumawati, E., dan Widiarti, N. (2015). Sintesis Geopolimer Berbusa Berbahan Dasar Abu Layang BatuBara dengan Hidrogen Peroksida sebagai Foaming Agent. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 13(1), 17-28. doi: 10.15294/saintekno.v12i2.5394
- Lestari, H.D. (2006). *Sintesis Katalis Ni/Mo untuk Hydrotreating Coker Nafta* (Tesis ed.). Bandung: Institut Teknologi Bandung.

- Manuahe, R., Sumajouw, M.D., dan Windah, R.S. (2014). Kuat Tekan beton Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 2, 277-282. doi: ISSN: 2337-6732
- Mirawati. (2016). *Mikrostruktur dan Konduktivitas Listrik Cordierite Berbasis Silika Sekam Padi dengan Penambahan Magnesium Oksida (0, 20, 25 dan 30%)* (Skripsi ed.). Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Mulyono, T. (2004). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Mulyono, T. (2005). *Teknologi beton*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Mushlihah. (2008). *Sintesis dan Karakterisasi Geopolimer dari Campuran Abu Layang PT. Semen Gresik Jawa Timur dan PLTU Asam-Asam Kalimantan Selatan*. Surabaya: Departemen Kimia Fakultas Sains Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Nikbin, I.M., Rahimi, S., Allahyari, H., dan Damadi, M. (2016). A Comprehensive Analytical Study on the Mechanical Properties of Concrete Containing Waste Bottom Ash as Natural Aggregate Replacement. *Construction and Building Materials*, 121, 746-759. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.078
- Nugroho, A., Wahyono, H., dan Fatimah, S. (2005). Pengembangan metode Analisis Menggunakan Alat ICP-AES Plasma 40 untuk Penentuan Unsur As dan Sb. *Hasil-Hasil Penelitian EBN tahun 2005*, 201-207.
- Nugroho, P. (2018). *Kinetika Leaching Ion Logam Berat Pb²⁺ pada Geopolimer Berbasis Abu Layang PT. IPMOMI*. Surabaya: Departemen Kimia.
- Olawale, M.D. (2013). Synthesis, Characterization and Binding Strength of Geopolymers: A Review. *International Journal*

- of materials Science and Applications*, 2(6), 185-193.
doi:doi: 10.11648/j.ijmsa.20130206.14
- Palomo, A., Grutzeck, M.W., dan Blanco, M.T. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes A Cement for The Future. *Cement and Concrete Research*, 29, 1323-1329.
- Panias, D., Asimidis, P., dan Paspaliaris, I. (2001). Solubility of Boehmite in Concentrated Sodium Hydroxide Solutions: Model Development and Assessment. *Hydrometallurgy*, 59(1), 15-29. doi:DOI: 10.1016/S0304-386X(00)00146-8
- Panias, D., Giannopoulou, I.P., dan Perraki, T.(2007). Effect of Synthesis Parameters on the Mechanical Properties of Fly-Ash Based Geopolymers. *Colloids and Surface A: Physicochem Engineering Aspects*, 301, 246-254. doi:10.1016/j.colsurfa.2006.12.064
- Purnawan, I., dan Prabowo, A. (2017). Pengaruh Penambahan Limestone terhadap Kuat Tekan Semen Portland Komposit. *Jurnal Rekayasa Proses*, 11(2), 86-93.
- Puspitasari, Y. dan Atmaja, L. (2009). Sintesis dan Karakterisasi Geopolimer Berdasarkan Variasi Rasio Mol SiO₂/Al₂O₃ dari Abu Layang PLTU Surabaya. *Prosiding Skripsi Semester*, 1-6.
- Putra, A.K., Wallah, S.E., dan Dapas, S.O. (2014). Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 2(7), 330-336.
- Querol, X., Moreno, N., Umana, J.C., Alastuey, A., Hernandez, E., Lopez-Soler, A., dan Plana, F. (2002). Synthesis of Zeolites from Coal Fly Ash: An Overview. *International Journal of Coal Geology*, 50, 413-423.
- Rattanaphani, V., dan Liawruanggrath, S. (2005). Determination of Some Heavy Metal Residues in Some Local Traditional Thai

Medicine By Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES). *31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology*.

- Rattanasak, U., dan Chindapasirt, P.(2009). Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. *Minerals Engineering*, 22, 1073-1078. doi:10.1016/j.mineng.2009.03.022
- Risdanareni, P., Puspitasari, P., dan Jaya, E.J. (2017). Chemical and Physical Characterization of Fly Ash as Geopolymer Material. *ETIC 2016*. doi: 10.1051/mateconf/20179701031
- Rommel, E., Kurniawati, D., dan Pradibta, A. P (2014). Improvement of The Physical Properties and Reactivity of Fly Ash As Cementitious On Concrete. *Media Teknik Sipil*, 12(2). doi:10.22219/jmts.v12i2.2282
- Rozek, P., Krol, M., dan Mozgawa, W. (2018). Spectroscopic Studies of Fly Ash-Based Geopolymers. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 198, 283-289. doi:10.1016/j.saa.2018.03.034
- Salami, B.A., Johari, M.A.M., Ahmad, Z.A., Maslehudin, M., dan Adewumi, A.A. (2018). Impact of Al(OH)₃ Addition to POFA on the Compressive Strength of POFA Alkali-Activated Mortar. *Construction and Building Materials*, 190, 65-82. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.076
- Samantasinghar, S., dan Singh, S.P.(2018). Effect of Synthesis Parameters on COMPRESSIVE Strength of Fly Ash-Slag Blended geopolymer. *Construction and Building Materials*, 170, 225-234. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.026
- Sari, D.K. (2018). *Kajian Karakteristik Kimia dan Fisika Abu Layang yang Menjadi Penentu Kekuatan Mekanik Perekat*

Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang. Surabaya: Departemen Kimia, Fakultas Ilmu Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Skvara, F. (2007). AlkaliActivated Material-Geopolymer. 661-675.
- Supriadi, W. (2017). *Amobilisasi Kation-Kation Logam Berat Menggunakan Geopolimer dari Abu Layang*. Surabaya: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tennakon, C., Sagoe-Crentsil, K., Nicolas, R.S., dan Sanjayan, J. (2015). Charateristic of Australian Brown Coal Fly Ash Blended Geopolymers. *Construction and Building Materials*, 101, 396-409. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.089
- Wardani, S.P.R. (2008, Desember 6). Pemanfaatan Limbah Batubara (Fly Ash) untuk Stabilisasi Tanah maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan. Semarang, Jawa Tengah, Indonesia.
- Windholz, M. (1976). *The Merck Index`*. USA: Merck and Co. Inc.
- Xiao, L., dan Jiang, D. (2017). The Effect of Fly Ash on the Mechanical Properties of Cinder Lightweight Aggregate Concrete. *3rd International Conference on Energy Materials and Environment Engineering*. Chine: IOP Publishing.
- Xu, H., dan Van Deventer, J.S.J. (2002). Geopolymerisation of Multiple Minerals. *Mineral Engineering*, 15, 1131-1139.

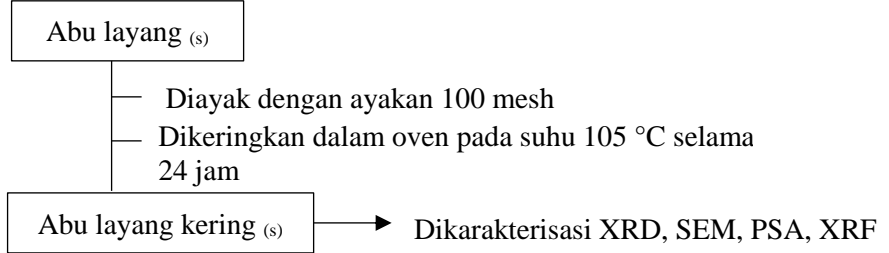
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

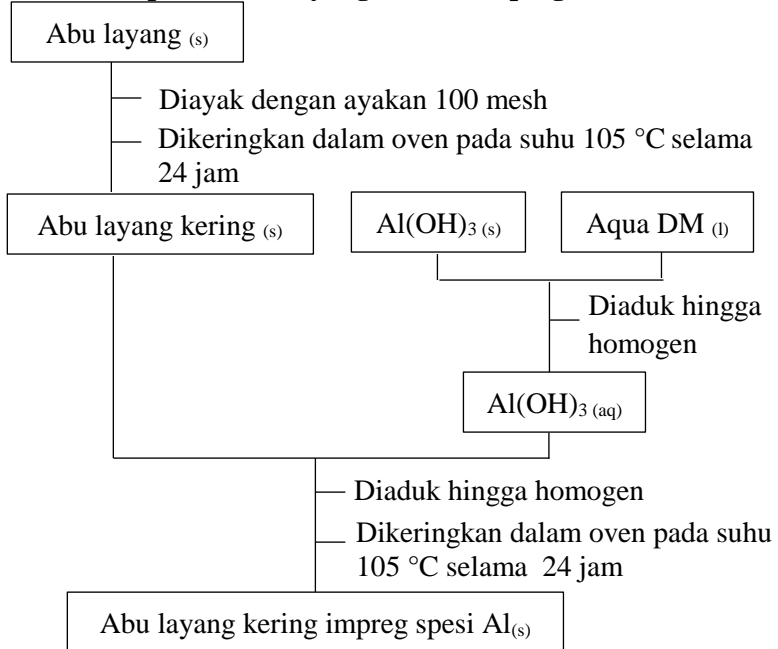
Lampiran 1

Skema kerja

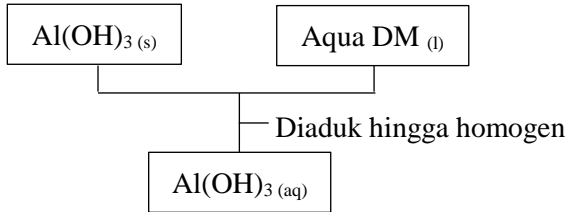
1. Preparasi abu layang metode non-impregnasi



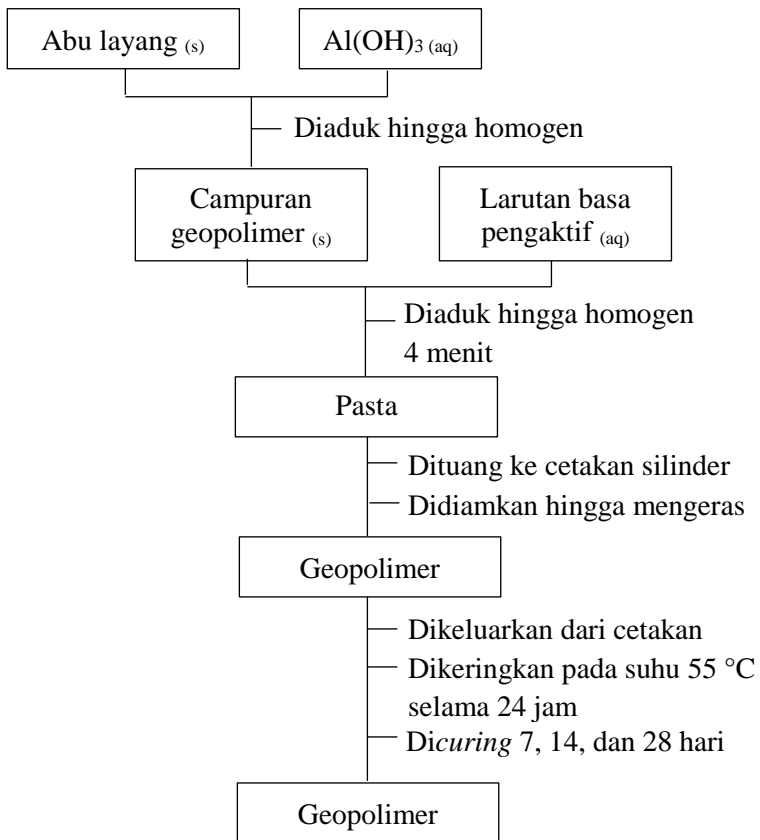
2. Preparasi abu layang metode impregnasi



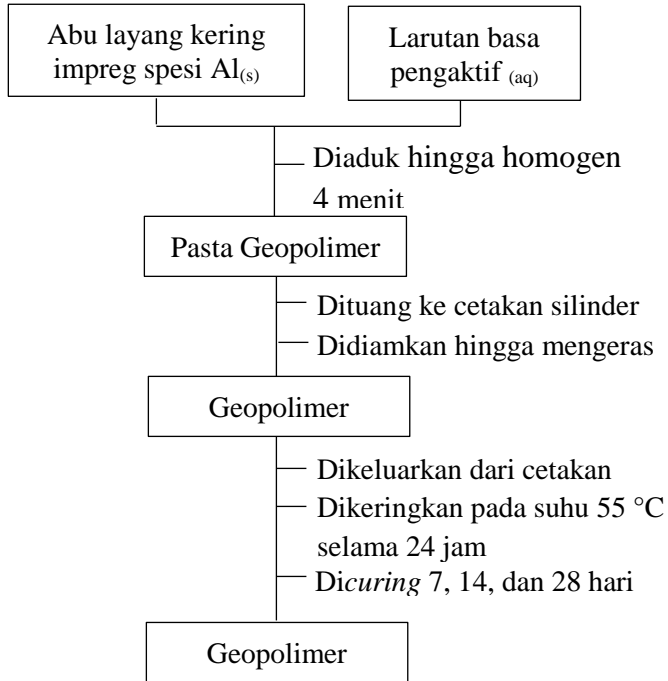
3. Pembuatan suspensi Al(OH)_3



4. Pembuatan geopolimer non-impregnasi

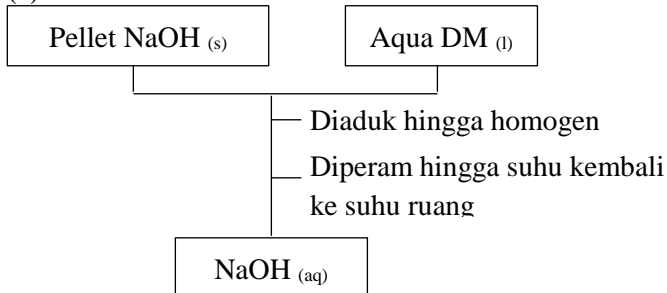


5. Pembuatan geopolimer non-impregnasi

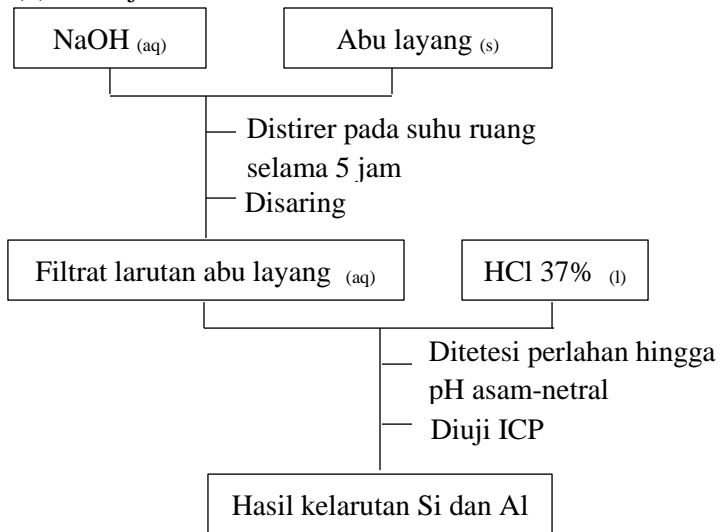


6. Uji kelarutan Si dan Al

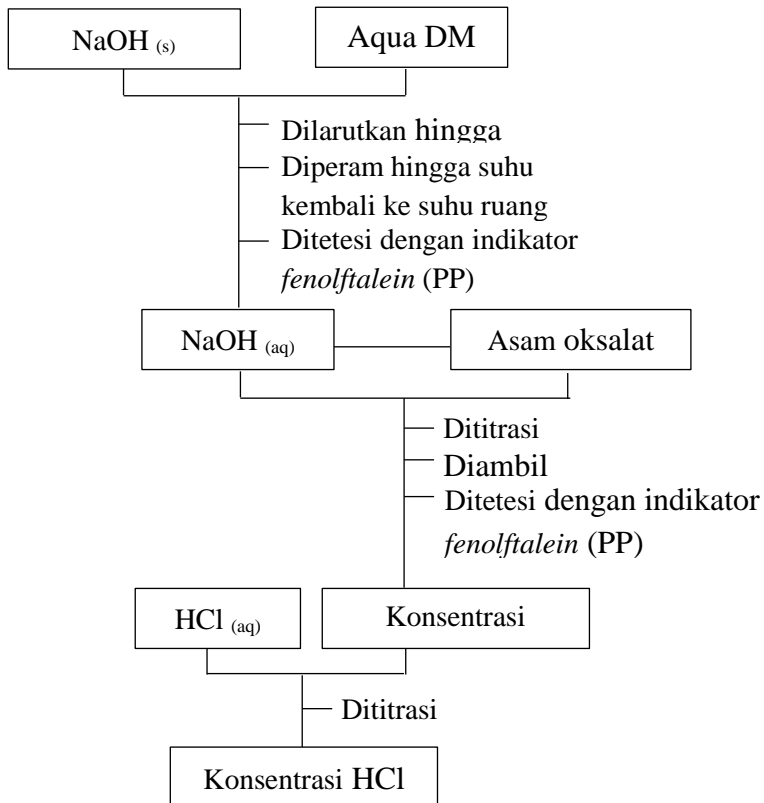
(a) Pembuatan larutan NaOH 10 M

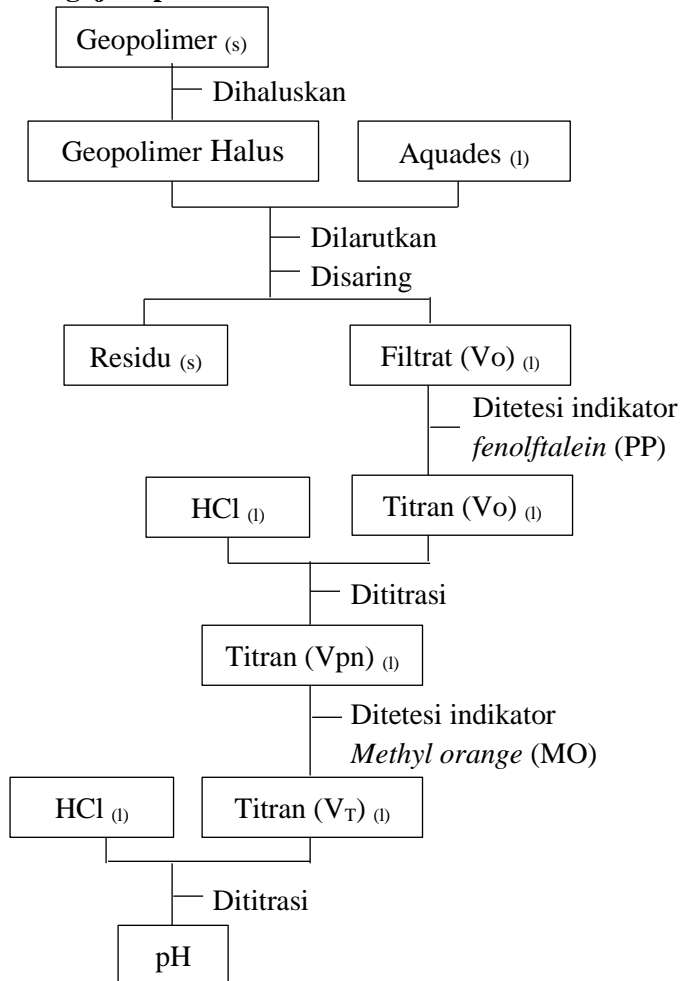


(b) Uji kelarutan Si dan Al



7. Standarisasi HCl



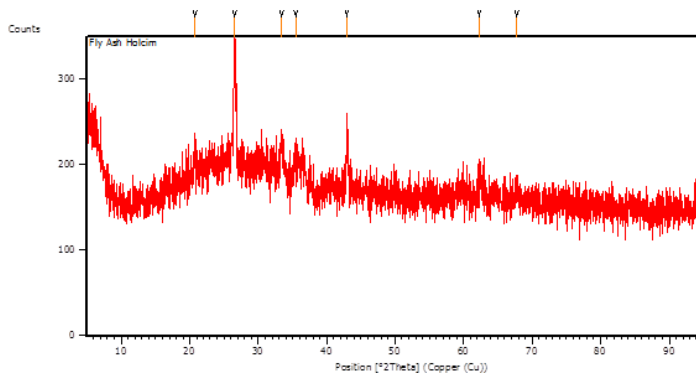
8. Pengujian pH

Lampiran 2

Hasil Karakterisasi Abu Layang

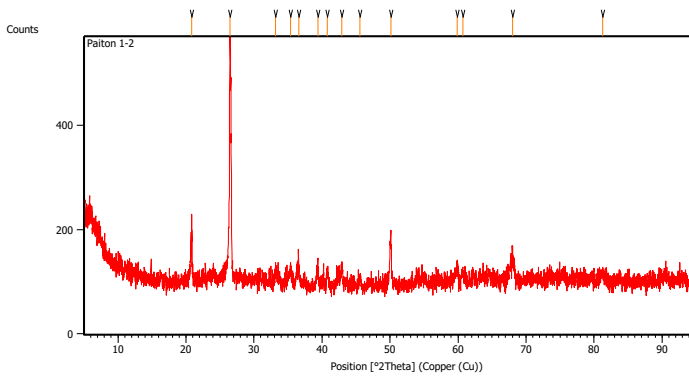
1. Analisis XRD (X-Ray Diffraction)

(a) Abu layang PLTU Holcim



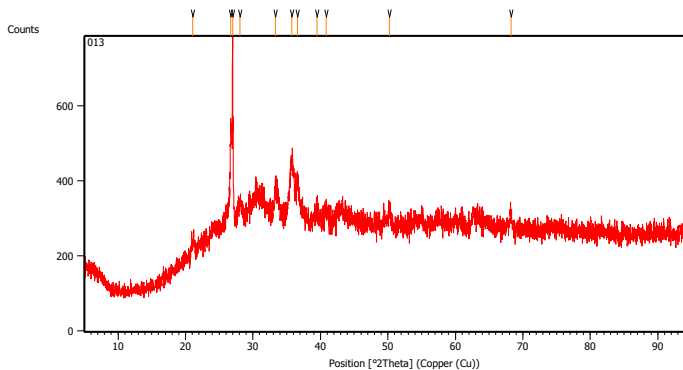
Pos. [$^{\circ}2\theta$.]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\theta$.]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
20.7881	19.15	0.4015	4.27308	13.39
26.5748	143.05	0.1338	3.35430	100.00
33.3808	34.22	0.5353	2.68432	23.92
35.4637	24.49	0.6691	2.53130	17.12
42.9515	72.81	0.2342	2.10577	50.90
62.3076	24.29	0.5353	1.49020	16.98
67.8307	15.78	0.8029	1.38169	11.03

(b) Abu layang PLTU Paiton 1-2



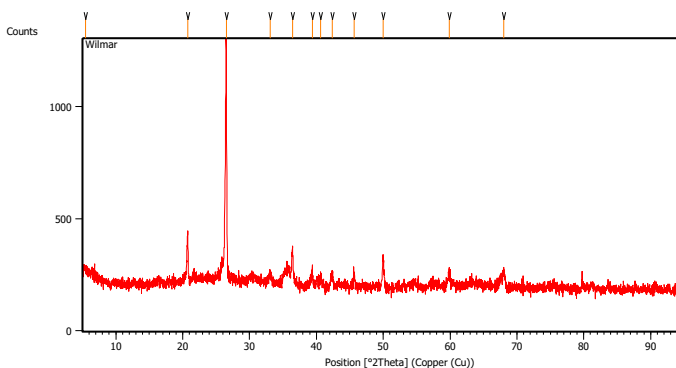
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.8327	100.64	0.1004	4.26404	22.60
26.4628	445.33	0.1171	3.36824	100.00
33.1823	23.59	0.5353	2.69992	5.30
35.3474	33.40	0.3346	2.53935	7.50
36.5715	42.59	0.2007	2.45712	9.56
39.4107	48.78	0.1338	2.28640	10.95
40.7917	28.17	0.2676	2.21213	6.32
42.9363	40.04	0.2007	2.10648	8.99
45.6043	14.50	0.4015	1.98926	3.26
50.1450	77.91	0.2007	1.81926	17.50
59.9129	29.08	0.2007	1.54391	6.53
60.7249	16.96	0.4015	1.52519	3.81
68.0305	40.89	0.6691	1.37812	9.18
81.2590	15.01	0.8029	1.18394	3.37

(c) Abu layang PLTU Ketapang



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
21.0915	24.90	0.4015	4.21229	5.02
26.6744	209.78	0.1673	3.34200	42.28
26.9712	496.15	0.0335	3.30589	100.00
28.0590	38.87	0.5353	3.18015	7.83
33.3178	64.01	0.2676	2.68925	12.90
35.7403	142.60	0.3346	2.51233	28.74
36.6343	116.02	0.2007	2.45305	23.38
39.4854	32.16	0.4015	2.28225	6.48
40.8774	31.18	0.6691	2.20769	6.29
50.2257	40.89	0.2676	1.81652	8.24
68.2211	47.40	0.2676	1.37473	9.55

(d) Abu layang PLTU Wilmar



Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
5.4501	24.28	0.8029	16.21553	2.47
20.7376	207.23	0.1338	4.28337	21.08
26.5219	983.12	0.1171	3.36086	100.00
33.0634	39.17	0.5353	2.70936	3.98
36.4216	152.43	0.1840	2.46689	15.50
39.3995	77.28	0.1673	2.28703	7.86
40.6521	47.53	0.2007	2.21941	4.83
42.3640	58.03	0.3346	2.13360	5.90
45.6539	49.37	0.2007	1.98721	5.02
49.9673	123.76	0.1673	1.82531	12.59
59.8534	61.30	0.2007	1.54530	6.24
68.0268	65.94	0.2676	1.37818	6.71

2. PSA (Particle Size Analyzer)

(a) Abu layang PLTU Holcim



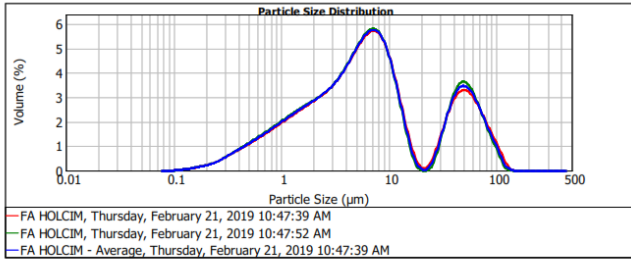
Result Analysis Report

Sample Name: FA HOLCIM - Average
SOP Name: Cement OPC
Measured: Thursday, February 21, 2019 10:47:39 AM
Sample Source & type: **Measured by:** MALVERN INSTRUMENTS
Analysed: Thursday, February 21, 2019 10:47:41 AM
Sample bulk lot ref:

Particle Name: Cement OPC	Accessory Name: Scirocco 2000	Analysis model: General purpose (fine)	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.860	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 μm	Obscuration: 2.85 %
Dispersant Name: 1.000	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.722 %	Result Emulation: On

Concentration: 0.0002 %Vol	Span : 8.965	Uniformity: 2.28	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.707 m^2/g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 2.324 μm	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 16.106 μm	

d(0.1): 0.924 μm d(0.5): 5.922 μm d(0.9): 54.017 μm



Step μm	Vol Under %	Step μm	Vol Under %	Step μm	Vol Under %	Step μm	Vol Under %	Step μm	Vol Under %	Step μm	Vol Under %
0.500	4.06	10.000	68.91	50.000	89.58	140.000	100.00	300.000	100.00	900.000	100.00
1.000	11.00	12.181	74.11	95.000	90.79	150.000	100.00	400.000	100.00	1000.000	100.00
1.500	11.50	15.000	77.28	60.000	93.23	160.000	100.00	425.000	100.00	1120.000	100.00
1.487	16.80	20.000	78.94	71.000	95.96	180.000	100.00	450.000	100.00	1180.000	100.00
1.500	16.95	25.000	79.44	75.000	96.20	200.000	100.00	500.000	100.00	1250.000	100.00
1.505	17.00	32.000	79.92	80.000	97.08	212.000	100.00	560.000	100.00	1400.000	100.00
1.716	19.32	36.000	81.52	90.000	98.96	224.000	100.00	600.000	100.00	1500.000	100.00
2.000	21.99	38.000	82.44	100.000	99.19	250.000	100.00	600.000	100.00	1700.000	100.00
2.300	26.36	40.000	83.40	106.000	99.54	280.000	100.00	710.000	100.00	1800.000	100.00
3.000	30.29	45.000	85.86	112.000	99.77	300.000	100.00	800.000	100.00	2000.000	100.00
5.000	44.19	50.000	88.26	125.000	99.95	315.000	100.00	850.000	100.00		

(b) Abu layang PLTU Paiton 1-2



Result Analysis Report

Sample Name:
FA PAITON 1-2 - Average
Sample Source & type:

Sample bulk lot ref:

SOP Name:
Cement OPC
Measured by:
MALVERN INSTRUMENTS

Measured:
Thursday, February 21, 2019 11:17:34 AM
Analysed:
Thursday, February 21, 2019 11:17:36 AM

Particle Name:
Cement OPC
Particle RI:
1.860
Dispersant Name:

Accessory Name:
Scirotco 2000
Absorption:
0.1
Dispersant RI:
1.000

Analysis model:
General purpose (fine)
Size range:
0.020 to 2000.000 um
Weighted Residual:
0.520 %

Sensitivity:
Normal
Obscuration:
3.24 %
Result Emulation:
On

Concentration:
0.0028 %Vol

Span :
1.945

Uniformity:
0.597

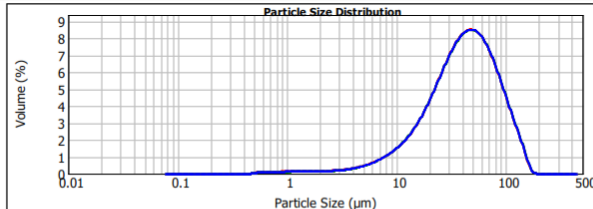
Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.0763 m²/g

Surface Weighted Mean D[3,2]:
21.540 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
48.531 um

d(0.1): 13.318 um d(0.5): 41.651 um d(0.9): 94.344 um



— FA PAITON 1-2, Thursday, February 21, 2019 11:17:34 AM
— FA PAITON 1-2, Thursday, February 21, 2019 11:17:45 AM
— FA PAITON 1-2 - Average, Thursday, February 21, 2019 11:17:34 AM

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
2.500	0.00	10.000	0.48	50.000	63.34	140.000	98.79	300.000	100.00	800.000	100.00
1.000	0.43	12.181	8.73	56.000	66.36	150.000	99.44	400.000	100.00	1000.000	100.00
1.040	0.46	15.000	11.99	63.000	72.60	160.000	99.83	425.000	100.00	1120.000	100.00
1.487	0.75	20.000	18.59	71.000	78.52	180.000	100.00	450.000	100.00	1180.000	100.00
1.500	0.75	25.000	23.80	78.000	81.04	200.000	100.00	500.000	100.00	1250.000	100.00
1.505	0.76	30.000	36.42	80.000	83.83	212.000	100.00	560.000	100.00	1400.000	100.00
1.710	0.87	35.000	42.25	90.000	88.39	224.000	100.00	600.000	100.00	1600.000	100.00
2.000	1.20	38.000	45.87	100.000	91.82	250.000	100.00	650.000	100.00	1700.000	100.00
2.500	1.23	40.000	47.81	105.000	93.40	280.000	100.00	710.000	100.00	1800.000	100.00
3.000	1.44	45.000	54.25	112.000	94.82	300.000	100.00	800.000	100.00	2000.000	100.00
5.000	2.45	50.000	60.11	125.000	97.08	315.000	100.00	850.000	100.00		

(c) Abu layang PLTU Ketapang



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
FA KETAPANG - Average
Sample Source & type:
1.860
Dispersant Name:
0.477

SOP Name:
Cement OPC
Measured by:
MALVERN INSTRUMENTS

Measured:
Thursday, February 21, 2019 11:10:39 AM
Analysed:
Thursday, February 21, 2019 11:10:40 AM

Particle Name:
Cement OPC
Particle RI:
1.860
Dispersant Name:
0.477

Accessory Name:
Sirocco 2000
Absorption:
0.1
Dispersant RI:
1.000

Analysis model:
General purpose (fine)
Size range:
0.020 to 2000.000 μm
Weighted Residual:
0.501 %

Sensitivity:
Normal
Obscuration:
3.93 %
Result Emulation:
On

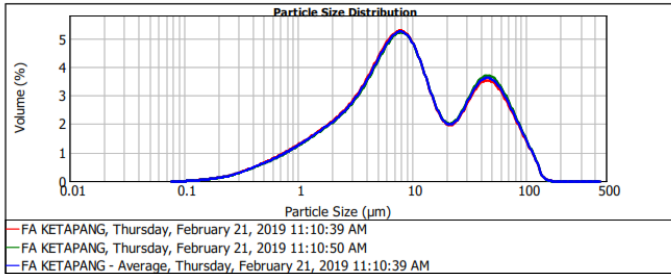
Concentration:
0.0005 %Vol
Specific Surface Area:
0.477 m^2/g

Span :
6.534
Surface Weighted Mean D[3,2]:
3.448 μm

Uniformity:
1.88
Vol. Weighted Mean D[4,3]:
20.617 μm

Result units:
Volume

d(0.1): 1.465 μm d(0.5): 8.817 μm d(0.9): 59.079 μm



Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %
0.300	2.19	10.000	54.15	33.000	67.50	140.000	99.99	325.000	100.00	1500.000	100.00
1.000	6.35	12.181	59.96	55.000	88.84	150.000	99.99	400.000	100.00	1000.000	100.00
1.046	6.73	15.000	64.74	63.000	91.33	160.000	100.00	425.000	100.00	1120.000	100.00
1.487	10.17	20.000	69.25	71.000	93.58	180.000	100.00	450.000	100.00	1180.000	100.00
1.590	10.36	25.000	72.19	75.000	94.50	200.000	100.00	500.000	100.00	1250.000	100.00
1.200	10.30	32.000	76.25	80.000	95.50	212.000	100.00	500.000	100.00	1400.000	100.00
1.716	11.84	35.000	78.65	90.000	97.06	224.000	100.00	600.000	100.00	1600.000	100.00
2.000	13.82	38.000	79.84	100.000	98.18	250.000	100.00	630.000	100.00	1700.000	100.00
2.500	17.09	40.000	81.00	105.000	98.08	280.000	100.00	710.000	100.00	1800.000	100.00
3.000	20.18	42.000	82.79	112.000	99.06	300.000	100.00	800.000	100.00	2000.000	100.00
5.000	31.70	50.000	86.25	125.000	99.71	315.000	100.00	850.000	100.00		

(d) Abu layang PLTU Wilmar



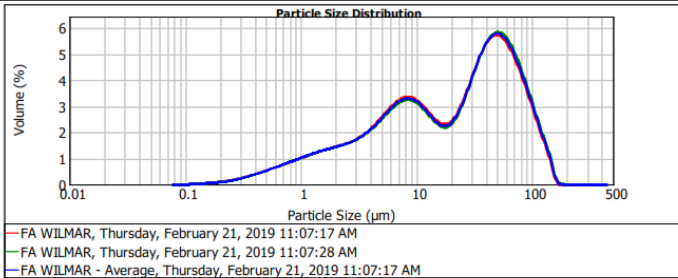
MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name: FA WILMAR - Average	SOP Name: Cement OPC	Measured: Thursday, February 21, 2019 11:07:17 AM	
Sample Source & type:	Measured by: MALVERN INSTRUMENTS	Analysed: Thursday, February 21, 2019 11:07:18 AM	
Sample bulk lot ref:			
Particle Name: Cement OPC	Accessory Name: Sirocco 2000	Analysis model: General purpose (fine)	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.860	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 μm	Obscuration: 3.44 %
Dispersant Name:	Dispersant RI: 1.000	Weighted Residual: 0.403 %	Result Emulation: On
Concentration: 0.0006 %Vol	Span : 3.483	Uniformity: 1.14	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.366 m^2/g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.491 μm	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 33.363 μm	

d(0.1): 1.811 μm d(0.5): 22.942 μm d(0.9): 81.712 μm



Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %
0.300	1.78	10,000	36.00	53,000	75.40	140,000	99.41	355,000	100.00
1,000	5.28	12,181	39.91	55,000	77.46	150,000	99.84	400,000	100.00
1,040	5.39	15,000	43.44	63,000	81.74	160,000	99.98	425,000	100.00
1,487	8.28	20,000	47.74	71,000	85.79	180,000	100.00	450,000	100.00
1,500	8.35	25,000	51.64	75,000	87.51	200,000	100.00	500,000	100.00
1,505	8.38	32,000	57.67	80,000	89.41	212,000	100.00	560,000	100.00
1,716	9.52	35,000	61.31	90,000	92.55	224,000	100.00	600,000	100.00
2,000	10.82	38,000	63.12	100,000	94.62	250,000	100.00	650,000	100.00
2,500	13.11	40,000	64.91	105,000	95.93	280,000	100.00	710,000	100.00
3,000	15.07	45,000	69.21	112,000	96.85	300,000	100.00	800,000	100.00
5,000	22.02	50,000	73.19	125,000	98.33	315,000	100.00	850,000	100.00

Lampiran 3

Perhitungan pH geopolimer

1. Pembuatan larutan NaOH 0,1M

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

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

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

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

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

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

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

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

Standarisasi NaOH	Volume Asam Oksalat	Konsentrasi NaOH
v ₁	5,1	0,102
v ₂	4,9	0,098
v ₃	4,9	0,098
	Rata-rata	0,099

Perhitungan standarisasi NaOH dihitung menggunakan:

$$M_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \times \text{Valensi} = M_{\text{As. Oksalat}} \times V_{\text{As. Oksalat}} \times \text{Valensi}$$

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

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

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

Standarisasi HCl	Volume NaOH	Konsentrasi HCl
v ₁	1,2	0,012
v ₂	1,1	0,011
v ₃	1,1	0,011
	Rata-rata	0,011

Perhitungan standarisasi NaOH dihirung menggunakan:

$$M_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}} \times \text{Valensi} = M_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \times \text{Valensi}$$

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

$$M_{\text{NaOH}} = 0,102$$

4. Perhitungan pH geopolimer

(a) Abu layang PLTU Holcim Non-Impregnasi

Umur	V _{PN}	V _T	[OH ⁻]	pOH	pH	pH rata-rata
H ₇	19,4	10,3	0,0285	1,54	12,46	12,48
H ₇	19,7	9,8	0,0296	1,53	12,47	
H ₇	21,1	11,2	0,0310	1,50	12,50	
H ₁₄	16,7	10,0	0,0234	1,63	12,37	12,42
H ₁₄	16,0	6,7	0,0253	1,60	12,40	
H ₁₄	21,3	11,2	0,0314	1,50	12,50	
H ₂₈	18,9	10,7	0,0271	1,57	12,43	12,42
H ₂₈	19,2	11,5	0,0269	1,57	12,43	
H ₂₈	20,5	11,7	0,0293	1,53	12,47	

(b) Abu layang PLTU Holcim Impregnasi

Umur	V _{PN}	V _T	[OH ⁻]	pOH	pH	pH rata-rata
H ₇	23,6	10,6	0,0366	1,44	12,56	12,55
H ₇	22,0	10,0	0,034	1,47	12,53	
H ₇	23,0	10,0	0,036	1,44	12,56	
H ₁₄	23,3	9,7	0,0369	1,43	12,57	12,56
H ₁₄	23,1	10,9	0,0353	1,45	12,55	
H ₁₄	23,3	9,8	0,0368	1,43	12,57	
H ₂₈	22,4	9,4	0,0354	1,45	12,55	12,54
H ₂₈	22,0	8,5	0,0355	1,45	12,55	
H ₂₈	21,8	9,2	0,0344	1,46	12,54	

(c) Abu layang PLTU Paiton 1-2 Non-Impregnasi

Umur	V _{PN}	V _T	[OH ⁻]	pOH	pH	pH rata-rata
P ₇	24,0	8,0	0,040	1,4	12,60	12,55
P ₇	24,0	8,9	0,039	1,50	12,50	
P ₇	23,5	10,5	0,0365	1,44	12,56	
P ₁₄	30,8	16,6	0,045	1,35	12,65	12,69
P ₁₄	33,1	14,4	0,0518	1,29	12,71	
P ₁₄	32,1	13,9	0,0503	1,27	12,73	
P ₂₈	8,5	0,5	0,0165	1,78	12,22	12,17
P ₂₈	7,9	1,2	0,0146	1,84	12,16	
P ₂₈	7,3	1,4	0,0132	1,88	12,12	

(d) Abu layang PLTU Paiton 1-2 Impregnasi

Umur	V _{PN}	V _T	[OH ⁻]	pOH	pH	pH rata-rata
P ₇	37,9	9,4	0,0664	1,18	12,82	12,85
P ₇	43,0	9,5	0,0765	1,12	12,88	
P ₇	43,2	10,0	0,0764	1,12	12,88	
P ₁₄	44,0	10,8	0,0772	1,11	12,88	12,88
P ₁₄	43,3	9,4	0,0772	1,11	12,88	
P ₁₄	42,7	10,9	0,0745	1,13	12,87	
P ₂₈	44,3	14,9	0,0737	1,33	12,87	12,85
P ₂₈	44,5	16,0	0,0730	1,14	12,86	
P ₂₈	42,9	14,1	0,0717	1,14	12,85	

Lampiran 3

Perhitungan pH geopolimer

1. Perhitungan Kuat tekan

Data yang diperoleh dari pengukuran kuat tekan adalah beban tekan yang dapat ditanggung oleh geopolimer dalam satuan Newton. Untuk mendapat data kuat tekan dengan satuan Mpa, data yang diperoleh dimasukkan dalam persamaan sebagai berikut:

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

P adalah kuat tekan dalam satuan Mpa

F adalah beban tekan geopolimer dalam satuan Newton

A adalah luas penampang geopolimer dalam satuan (m²)

Penampang geopolimer berbentuk lingkaran sehingga digunakan rumus luas lingkaran, dengan rumus:

$$A = \pi \times r^2$$

$$\pi = 3,14$$

$$R = 0,01 \text{ cm}$$

$$r^2 = 10^{-4}$$

	Non-Impregnasi		Impregnasi	
	Holcim	Paiton 1-2	Holcim	Paiton 1-2
7 Hari (N)	5000	3000	5000	3000
	4000	3000	5000	3000
	4000	4000	8000	3000
14 Hari (N)	7000	6000	13000	5000
	13000	5000	9000	7000
	13000	6000	11000	5000
28 Hari (N)	17000	4000	15000	6000
	7000	13000	9000	6000
	10000	10000	10000	6000

$$P = \frac{F}{A} = \frac{5000}{3,14 \times 10^{-4}} = 15,9$$

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

	Non-Impregnasi		Impregnasi	
	Holcim	Paiton 1-2	Holcim	Paiton 1-2
7 Hari (MPa)	15,9	9,5	15,9	9,5
	12,7	9,5	15,9	9,5
	12,7	12,7	25,5	9,5
Rata-rata	13,8	10,6	19,1	9,5
14 Hari (MPa)	22,3	19,2	41,4	15,9
	41,4	15,9	28,7	22,3
	41,4	19,2	35,0	15,9
Rata-rata	35	18	35,0	18,0
28 Hari (MPa)	54,1	12,7	47,7	19,1
	23,9	41,4	28,7	19,1
	31,8	31,8	31,8	19,1
Rata-rata	36,6	28,7	36,0	19,1

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Fitria Sandi Faradilla, dilahirkan di Malang, 04 mei 1998 yang merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis merupakan lulusan dari SMAN 4 Malang. Penulis diterima di Departemen Kimia FS ITS melalui jalur SNMPTN dengan NRP 01211540000045. Selama kuliah penulis aktif dalam organisasi kemahasiswaan yaitu Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMKA) ITS sebagai *staff* periode 2016/2017 Hubungan Luar (HUBLU). Penulis

aktif mengikuti pelatihan LKMM, kerohanian, dan panitia organisasi. Penulis juga pernah menjadi panitia dalam acara olimpiade nasional Chemistry Week 8 sebagai sie dana usaha dan Chemistry Week 9 sebagai sie publikasi. Penulis mengambil bidang minat Geopolimer sebagai penelitian Tugas Akhir di bawah bimbingan Bapak Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D dalam Laboraturium Kimia Material dan Energi. Kritik dan saran dapat disampaikan kepada penulis melalui email ffitriasandi@yahoo.co.id