



SKRIPSI

**SINTESIS GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR
ABU LAYANG DARI TIGA PLTU:
INDRAMAYU, ASAM-ASAM DAN SANGGAU**

**CAGAR IRWIN BAYU PAMUNGKAS
0121154000017**

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

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



SCRIPT

**SYNTHESIS OF FLY ASH BASED
GEOPOLYMERS FROM COAL FIRED POWER
PLANTS: INDRAMAYU, ASAM-ASAM AND
SANGGAU**

**CAGAR IRWIN BAYU PAMUNGKAS
0121154000017**

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

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

**SINTESIS GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU
LAYANG DARI TIGA PLTU: INDRAMAYU, ASAM-
ASAM DAN SANGGAU**

SKRIPSI

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

Oleh:

CAGAR IRWIN BAYU PAMUNGKAS

NRP. 0121154000017

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

**LEMBAR PENGESAHAN
GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU LAYANG
DARI TIGA PLTU: INDRAMAYU, ASAM-ASAM DAN
SANGGAU**

SKRIPSI

Oleh:

CAGAR IRWIN BAYU PAMUNGKAS

NRP. 0121154000017

Surabaya, 22 Juli 2019

Menyetujui,

Dosen Pembimbing



Hamzah Fansuri, M.Si, Ph.D.

NIP. 19691017 199412 1 001



**Mengetahui:
Kepala Departemen Kimia,**

Prof. Dr. Didik Prasetyoko, S.Si., M.Si.

NIP. 19710616 199703 1 002

SINTESIS GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU LAYANG DARI TIGA PLTU: INDRAMAYU, ASAM-ASAM DAN SANGGAU

Nama : Cagar Irwin Bayu Pamungkas
NRP : 0121154000017
Departemen : Kimia
Pembimbing : Hamzah Fansuri, M.Si, Ph.D.

ABSTRAK

Geopolimer disintesis menggunakan bahan dasar abu layang dari PLTU Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau. Abu layang diuji beberapa karakteristiknya menggunakan XRD, XRF, ICP, SEM dan PSA sebelum geopolimer disintesis. Hasil analisa XRD menunjukkan bahwa terdapat puncak-puncak khas berupa kuarsa, *mullite* dan *calcite* pada ketiga sampel abu layang dari sumber yang berbeda. Abu layang PLTU Indramayu memiliki fasa lebih amorf dibandingkan dengan abu layang dari sumber lainnya. Analisis XRF menunjukkan ketiga abu layang dari sumber yang berbeda termasuk dalam abu layang kelas F dan *low calcium*. Hasil uji kelarutan abu layang menunjukkan bahwa kelarutan Si dan Al tertinggi yaitu masing-masing 25,14 ppm dan 1,5 ppm yang didapatkan pada abu layang dari PLTU Indramayu. Analisis SEM menunjukkan morfologi dari abu layang PLTU Indramayu dan PLTU Asam-Asam berbentuk bulat (*spherical*) dengan ukuran partikel yang berbeda-beda, namun pada abu layang PLTU Sanggau bentuk morfologinya tidak beraturan. Hasil analisa PSA menunjukkan abu layang dari PLTU Sanggau memiliki tingkat kehalusan yang tinggi dibanding abu layang dari sumber lain. Abu layang PLTU Indramayu dan Asam-Asam berhasil disintesis menjadi geopolimer. Hasil uji kuat tekan tertinggi diperoleh geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Indramayu 7 hari dengan nilai kuat tekan

sebesar 28,65 MPa. pH geopolimer berada pada rentang 12,09-12,91 yang sama dengan pH dari mortar semen PC.

Kata Kunci: Abu layang, Geopolimer, Kuat Tekan, pH

SYNTHESIS OF FLY ASH BASED GEOPOLYMERS FROM COAL FIRED POWER PLANTS: INDRAMAYU, ASAM-ASAM AND SANGGAU

Name : Cagar Irwin Bayu Pamungkas

NRP : 0121154000017

Departement : Chemistry

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

ABSTRACT

Geopolymers in this research, synthesized by fly ash from PLTU Indramayu, Asam-Asam and Sanggau were synthesized. The fly ash was tested for several characteristics using XRD, XRF, ICP, SEM and PSA before the geopolymer was synthesized. The results of the XRD analysis show that there are typical peaks in the form of quartz, mullite and calcite in the three fly ash samples from different sources and the fly ash from PLTU Indramayu has a more amorphous phase compared to fly ash from other sources. XRF analysis shows the three fly ash from different sources including class F and low calcium fly ash. The results of fly ash solubility test showed that the highest Si and Al solubility were 25.14 ppm and 1.5 ppm respectively obtained from fly ash from Indramayu PLTU. SEM analysis represent the morphology of the fly ash of Indramayu PLTU and the Asam-Asam PLTU is spherical with different particle sizes, but in the fly ash of the Sanggau PLTU the irregular morphology forms. The results of the PSA analysis show that fly ash from the Sanggau PLTU has a high level of smoothness compared to fly ash from other sources. The fly ash from PLTU Indramayu and Asam-Asam was successfully synthesized into geopolymers. The highest compressive strength test results obtained from geopolymers based on fly ash PLTU Indramayu 7 days with compressive strength of 28.65 MPa. The geopolymer pH is in the range 12.09-12.91 which is the same as the pH of the PC cement mortar.

Keyword: Fly Ash, Geopolymers, Compressive strength, pH

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamin. Puji syukur kehadiran Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan dengan baik naskah tugas akhir yang berjudul “**Sintesis Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang dari Tiga PLTU: Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau**”. Tulisan ini tidak akan terwujud tanpa bantuan, dukungan, doa dan serta dorongan semangat dari semua pihak. Untuk itu penulis sangat berterima kasih kepada:

1. Hamzah Fansuri, S.Si., M.Si., Ph. D. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan selama proses penelitian dan penyusunan naskah tugas akhir ini.
2. Prof. Dr. Fahimah Martak, M.Si selaku dosen wali yang telah membimbing selama penulis berkuliah di Kimia ITS.
3. Prof. Dr. Didik Prasetyoko, M. Sc, selaku Kepala Departemen Kimia atas fasilitas yang telah diberikan selama pengerjaan penelitian ini.
4. Dr. Djoko Hartanto, M.Si, selaku Kepala Laboratorium Kimia Material dan Energi yang telah memberikan fasilitas selama pengerjaan skripsi.
5. Dosen-dosen Departemen Kimia ITS atas ilmu dan bimbingannya selama penulis belajar di Kimia ITS
6. Keluarga di Jember yang selalu memberi doa , dukungan serta semangat yang tiada henti.
7. Keluarga GOLDSCHMIDT, teman seperjuangan Kopi Skuad dan tim penelitian geopolimer (Fitria, Indri, Danang, Dadang, dan Bagus Akbar) atas semua bantuan dan pengertiannya.

8. M. Ihsan Machmudi sebagai sahabat terdekat penulis yang selalu mendukung dalam penyelesaian tugas akhir ini.
9. Teman-teman BJGxPKL yang telah memberikan dorongan moral kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir.
10. Garcelina R. Anindika sebagai partner dan penyemangat dalam penyelesaian tugas akhir.

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

Surabaya, 24 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN AWAL	i
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1. Geopolimer.....	3
2.1.1. Sumber Aluminosilikat.....	5
2.1.2. Basa Pengaktif	5
2.1.3. Reaksi Geopolimerisasi	6
2.1.4. Sifat Mekanik Geopolimer	7
2.2. Abu Layang.....	8
2.3. <i>X-Rays Diffraction (XRD)</i>	12
2.4. ICP / OES.....	14
2.5. <i>X-Rays Fluoresence (XRF)</i>	16
2.6. <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	17
2.7. <i>Particle Size Analyzer (PSA)</i>	18
2.7 Uji Kuat Tekan	19
2.8. Penentuan Nilai pH.....	20
BAB III METODOLOGI.....	23
3.1. Alat dan Bahan	23
3.1.1. Alat.....	23
3.1.2. Bahan.....	23
3.2. Prosedur Kerja.....	23
3.2.1 Preparasi Abu Layang	23
3.2.2 Uji Kelarutan Abu Layang	24

3.2.3	Pembuatan Basa Pengaktif	24
3.3.	Sintesis Geopolimer	24
3.3.1.	Sintesis Geopolimer Indramayu dan Sanggau	24
3.3.2.	Sintesis Geopolimer Asam-Asam	25
3.4.	Karakterisasi Abu Layang dan Geopolimer	25
3.4.1.	<i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	25
3.4.2.	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	26
3.4.3.	<i>X-Ray Fluoresence</i> (XRF).....	26
3.4.4.	<i>Inductively Coupled Plasma Spectrometer</i> (ICP)....	26
3.4.5.	Uji Kuat Tekan Geopolimer	26
3.4.6.	Standarisasi HCl.....	27
3.4.7.	Penentuan pH Geopolimer	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		29
4.1.	Karakteristik Abu Layang	29
4.1.1.	Komposisi Fasa Mineral dan Kekristalan.....	29
4.1.2.	Komposisi Unsur Abu Layang.....	31
4.1.3.	Morfologi Abu Layang.....	35
4.1.4.	Distribusi Ukuran Partikel	38
4.1.5.	Kelarutan Si dan Al	41
4.2.	Sintesis Geopolimer	42
4.3.	Kuat Tekan Geopolimer.....	48
4.4.	Penentuan pH Geopolimer	50
BAB V KESIMPULAN		53
DAFTAR PUSTAKA		55
LAMPIRAN		65
BIOGRAFI PENULIS		83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Macam-macam bentuk dasar geopolimer (Davidovits, 1994).....	4
Gambar 2.2	Reaksi geopolimerisasi (Davidovits, 1991).....	7
Gambar 2.3	Difraksi sinar X yang mengenai bidang kisi (Grant dan Suryanayana, 1998).....	13
Gambar 2.4	Rangkaian instrument ICP/OES (Todoli dan Mermet, 2008).....	15
Gambar 2.5	Prinsip Kerja XRF (Gosseau, 2009)	16
Gambar 2.6	Komponen SEM (sumber : www.iastate.edu , diakses tanggal 4 Juni 2019 pukul 05.00)	17
Gambar 2. 7	Mikrograf abu layang tipe C (Hills, 1996).....	18
Gambar 4.1	Proses pencetakan dan pemeraman pasta geopolimer pada cetakan silinder dengan abu layang (A) Indramayu dan (B) Asam-Asam..	45
Gambar 4.2	Geopolimer dari abu layang PLTU Asam-Asam	46
Gambar 4.3	Adonan abu layang PLTU Sanggau yang tidak dapat menjadi pasta.....	47
Gambar 4.4	Hasil pengukuran kuat tekan geopolimer	49
Gambar 4 5	Difraktogram abu layang (a) PLTU Asam-Asam, (b) PLTU Indramayu dan (c) PLTU Sanggau.....	30
Gambar 4.6	Mikrograf abu layang PLTU Indramayu.....	36
Gambar 4.7	Mikrograf abu layang PLTU Asam-Asam.....	37
Gambar 4.8	Mikrograf abu layang PLTU Sanggau	37
Gambar 4.9	Distribusi ukuran partikel abu layang PLTU (A) Indramayu, (B) Asam-Asam dan (C) Sanggau... ..	38
Gambar 4.10	Kelarutan Si dan Al pada abu layang PLTU Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau.....	41

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	ASTM 618-89 Persyaratan Pozzolan Tipe N Digunakan Sebagai Campuran Mineral Dalam Semen Beton Portland. (Annual Book of ASTM Standard, 1989)	11
Tabel 4. 1	Komposisi unsur abu layang hasil karakterisasi X-Ray Fluoresence (XRF).....	32
Tabel 4. 2	Klasifikasi tipe abu layang yang digunakan.....	35
Tabel 4. 3	Hasil pengukuran partikel abu layang.....	38
Tabel 4. 4	Distribusi ukuran partikel abu layang (μm)	39
Tabel 4. 5	Hasil pengukuran uji kelarutan.....	42
Tabel 4. 6	Hasil pengamatan pada pembuatan geopolimer ..	44
Tabel 4. 7	Rincian data kuat tekan geopolimer	49
Tabel 4. 8	Nilai pH pada setiap umur geopolimer	50

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A: SKEMA KERJA.....	65
LAMPIRAN B : PERHITUNGAN.....	71
LAMPIRAN C: HASIL KARAKTERISASI ABU LAYANG	75

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Abu layang adalah limbah B3 dari pembakaran batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Abu layang terdiri dari zat anorganik, zat yang tidak terbakar dalam batubara yang menyatu selama pembakaran menjadi struktur kaca yang amorf. Pembakaran batubara dalam PLTU menghasilkan limbah padat berupa abu layang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Partikel abu yang terbawa gas buang disebut abu layang, sedangkan abu yang tertinggal dan dikeluarkan dari bawah tungku disebut abu dasar. Produksi abu layang di Indonesia terus meningkat tiap tahun. Jumlah produksi abu layang mencapai 1,66 milyar ton pada tahun 2000 dan diperkirakan mencapai 2 milyar ton pada tahun 2006 (Majari Megazine, 2014). Abu layang umumnya ditimbun di *landfill* atau ditumpuk begitu saja di dalam area industri. Penumpukkan abu layang ini menimbulkan masalah bagi lingkungan dan kesehatan karena sifatnya yang berbahaya.

Salah satu penanganan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah mengkonversi abu layang menjadi material lain, seperti geopolimer. Nama geopolimer pertama kali dipopulerkan oleh Davidovits (1994), yang mulai mencari bahan konstruksi tidak mudah terbakar. Geopolimer merupakan hasil aktivasi alkali oleh bahan-bahan yang mengandung alumina dan silika. Abu layang adalah salah satu bahan yang mengandung alumina dan silika (Shi dkk., 2011).

Sifat-sifat geopolimer sangat bergantung pada karakteristik dari abu layang yang digunakan (komposisi kimia, kadar keamorfan, jumlah ion-ion silikat dan aluminat yang dapat larut, distribusi ukuran partikel, dan adanya partikel inert) (Fernandez Jimenez dkk., 2006, van Deventer dkk., 2007). Sifat-sifat dari abu layang tersebut sangat bergantung pada jenis batubara asal dan proses pembakaran

batu bara tersebut. Setiap abu layang memiliki sifat kimia dan fisika yang berbeda-beda dan hal tersebut mempengaruhi proses geopolimerisasi dari abu layang (Fansuri dkk., 2008). Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan penyelidikan tentang pengaruh sifat kimia-fisika dari abu layang yang dihasilkan dari berbagai sumber yang berbeda terhadap pembuatan geopolimer dan sifat-sifat geopolimer yang dihasilkan.

1.2. Perumusan Masalah

Sebagaimana uraian sebelumnya yang menunjukkan bahwa sifat-sifat abu layang hasil dari pembakaran batubara sangat menentukan sifat geopolimer. Berdasarkan penelitian Ekaputri (2007), diketahui bahwa hanya abu layang tertentu saja yang dapat dibuat menjadi geopolimer, namun belum dilakukan kajian lebih dalam mengenai sifat-sifat kimia dan fisika abu layang yang mempengaruhi sifat-sifat geopolimer. Oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan sintesis geopolimer dengan bahan baku abu layang yang berasal dari 3 PLTU. Dalam penelitian ini, bahan baku yang digunakan masing-masing adalah abu layang dari PLTU Indramayu, PLTU Asam-Asam dan PLTU Sanggau.

1.3. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui sifat-sifat kimia dan fisika abu layang yang mempengaruhi sifat geopolimer.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang faktor-faktor yang mempengaruhi pembuatan dan sifat-sifat dari geopolimer yang dihasilkan sehingga dapat digunakan sebagai material pengganti semen Portland.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Geopolimer

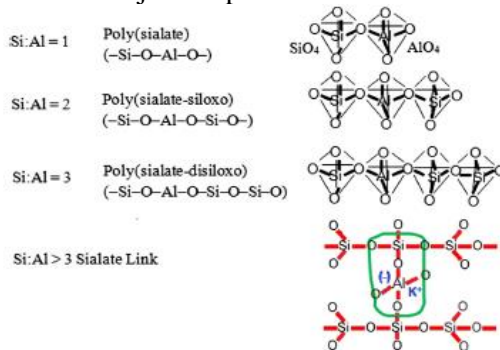
Geopolimer adalah material baru yang tahan api dan panas. Geopolimer dapat digunakan sebagai pelapis dan perekat, keramik suhu tinggi, pengikat untuk serat komposit yang tahan api, enkapsulasi limbah beracun dan radioaktif, serta semen untuk campuran beton. Sifat dan penggunaan geopolimer banyak dieksplorasi dalam studi ilmiah dan industri berbagai disiplin ilmu: kimia anorganik, kimia fisik, kimia koloid, mineralogi, geologi, dan jenis lain dari teknologi rekayasa proses.

Geopolimer merupakan material polimer. Ada dua jenis polimer yaitu, polimer organik (polimer berbasis karbon) dan polimer anorganik (polimer berbasis silikon). Polimer-polimer organik terdiri dari polimer alam (seperti karet dan selulosa), polimer organik sintetis (serat tekstil, plastik, film, elastomer, dll) dan biopolimer alam. Joseph Davidovits menciptakan istilah geopolimer karena bahan baku yang digunakan dalam sintesis polimer berbasis silikon pada tahun 1978.

Geopolimer dihasilkan dari reaksi material yang mengandung sejumlah besar silika dan alumina dengan larutan basa. Geopolimer pada umumnya merupakan beton yang tidak memakai semen sebagai pengikatnya. Material ini telah banyak diteliti dan hasilnya menunjukkan bahwa beton geopolimer merupakan material yang lebih ramah lingkungan karena relatif sangat sedikit sekali energi yang dibutuhkan dalam prosesnya. Peneliti pun kemudian bergeser dari ranah kimia menjadi aplikasi teknik dan produksi komersial. Beton geopolimer memiliki sifat teknis yang sangat baik serta mengurangi pemanasan global yang diakibatkan oleh produksi semen Portland.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Suralaya menghasilkan 878,8 ton abu layang yang ditimbun atau dibuang di sekitar PLTU. Presentasi pemanfaatan abu layang sebagai bahan baku konstruksi sangat kecil (kurang dari 1%). PLTU Suralaya setiap jamnya menghasilkan abu sisa pembakaran sebanyak 111 Ton, pada saat beban penuh. Kesimpulan dari data tersebut yaitu kontinuitas dari abu layang pada PLTU Suralaya dari tahun ke tahun semakin meningkat (Endawati, 2012).

Geopolimer memiliki komposisi kimia menyerupai zeolit tetapi memiliki bentuk struktur tiga dimensi yang amorf sampai semi-kristal dengan jaringan polimerik Si-O-Al. Tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ secara alternatif berikatan dengan berbagai atom oksigen. Hal tersebut membuat Al memiliki muatan negatif yang diseimbangkan oleh kation seperti Na^+ , K^+ , Li^+ , NH_4^+ dan H_3O^+ . Kehadiran kation penyeimbang tersebut sangat penting untuk mempertahankan kenetralan struktur geopolimer. Secara terminologi, struktur dari geopolimer dapat dikategorikan menjadi tiga bentuk dasar geopolimer tergantung dari rasio Si/Al, yaitu *poly(sialate)*, *poly(sialate-siloxo)*, dan *poly(sialate-disiloxo)*. Bentuk dasar dari geopolimer ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Macam-macam bentuk dasar geopolimer (Davidovits, 1994)

Rumus empirik dari geopolimer disajikan pada persamaan 2.1:



Z adalah bilangan 1, 2, atau 3 sampai dengan 32; M adalah kation monovalen, “n” adalah derajat polikondensasi, dan “w” adalah jumlah H₂O yang terikat (Liew dkk., 2016).

2.1.1. Sumber Aluminosilikat

Aluminosilikat digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan geopolimer dikarenakan kandungannya kaya akan alumina (Al₂O₃) dan silika (SiO₂). Sumber dari aluminosilikat yang digunakan dalam sintesis geopolimer dapat diperoleh dari kerak bumi. Kaolinit digunakan untuk mensintesis geopolimer pada awal pengembangan geopolimer. Penelitian diperluas pada bahan baku yang lain seperti tanah liat yang terkalsinasi, limbah industri, *waterglass*, *slag*, abu layang sisa dari pembakaran batu bara dan masih banyak lagi yang lain baik aluminosilikat alami maupun buatan (seperti zeolit, bubuk murni Al₂O₃-SiO₂, dan lain-lain). Sumber aluminosilikat tersebut berperan penting dalam pembentukan geopolimer sebagai sumber ion Al³⁺ dan ion Si⁴⁺ yang penting dalam sistem ikatan geopolimer (Liew dkk., 2016).

2.1.2. Basa Pengaktif

Basa pengaktif memiliki peranan yang sangat penting dalam sintesis geopolimer. Basa aktivator memiliki peran sebagai pengaktif prekursor (sumber aluminosilikat) dengan melarutkan prekursor untuk membebaskan unit AlO₄⁵⁻ dan SiO₄⁴⁻ tetrahedral dan membuat spesi-spesi tersebut mengalami proses polikondensasi untuk membentuk geopolimer. Basa pengaktif yang biasanya digunakan dalam sintesis geopolimer adalah basa yang memiliki kation dari logam alkali yaitu natrium dan kalium. Anion dari basa pengaktif dapat berupa ion hidroksi dan juga silikat. Basa pengaktif yang digunakan dalam sintesis geopolimer adalah

alkali silikat (Na_2SiO_3 (*waterglass*) atau K_2SiO_3) atau alkali hidroksida (NaOH atau KOH) (Liew dkk., 2016).

2.1.3. Reaksi Geopolimerisasi

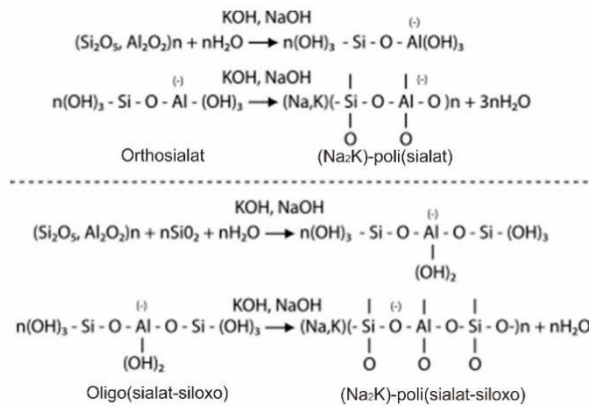
Reaksi yang berlangsung saat pembentukan geopolimer biasanya disebut reaksi geopolimerisasi. Reaksi geopolimerisasi adalah reaksi kimia dimana terjadi perubahan sebagian atau semua sumber aluminosilikat dengan cepat menjadi bentuk jaringan polimerik tiga dimensi. Banyak peneliti yang setuju bahwa pembentukan geopolimer meliputi pelarutan spesi Al^{3+} dan Si^{4+} dari permukaan sumber aluminosilikat, polimerisasi permukaan gugus aktif dan spesi yang terlarut menjadi bentuk gel, dan yang terakhir adalah pengerasan dari bentuk gel menjadi bentuk padatan yang kaku.

Geopolimerisasi termasuk reaksi eksotermis dan telah diasumsikan bahwa sintesis dilakukan melalui oligomer (dimer, trimer) yang menyediakan unsur dengan bentuk tiga dimensi. Kehadiran ion hidroksi pada reaktan basa memulai pelarutan aluminosilikat dan melepaskan spesi silikat dan aluminat untuk mendorong reaksi polimerisasi lebih lanjut, dalam medium basa. Besar pelarutan bergantung pada kehalusan, kapabilitas pertukaran ion, konsentrasi larutan alkali dan struktur dari material prekursor. Reaksi geopolimerisasi diusulkan secara multistep yang terjadi secara simultan:

1. Pelarutan aluminosilikat dalam reaktan alkali pekat
2. Penataulangan dan penggabungan ion-ion terlarut dengan pembentukan struktur koagulan yang kecil
3. Polikondensasi untuk membentuk aluminosilikat berfasa gel
4. Perubahan menjadi keadaan padat dan pengerasan untuk membentuk padatan yang keras

Ikatan kovalen $-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-$ dan $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ terputus menjadi fase koloid saat kontak dengan larutan basa selama proses geopolimerisasi. Produk yang terlarut berinteraksi dan membentuk struktur koagulan. Produk intermediet (Gel 1)

dimana memiliki kandungan Al yang tinggi berubah menjadi Gel 2 dimana memiliki kandungan Si yang lebih tinggi sebagai proses dari reaksi. Gel akan terus tumbuh dan membentuk jaringan geopolimer. Mekanisme dari pemutusan ikatan kovalen Al dan Si sampai proses pembentukan jaringan geopolimer dapat ditunjukkan dalam Gambar 2.2. Laju pembentukan geopolimer sangat cepat, sehingga membutuhkan ketrampilan saat mencampurkan prekursor dengan basa pengaktif (Liew dkk., 2016).



Gambar 2. 2 Reaksi geopolimerisasi (Davidovits, 1991)

2.1.4. Sifat Mekanik Geopolimer

Kuat tekan (*compressive strength*) dan kuat lentur (*flexural strength*) merupakan sifat mekanik yang digunakan sebagai parameter geopolimer. Kuat tekan pada geopolimer dipengaruhi oleh beberapa parameter, yakni:

1. Umur beton
2. Suhu dan lama waktu pengeringan
3. Kadar air dalam campuran air

Waktu pengeringan dapat mempengaruhi kuat tekan beton geopolimer. Hasil penelitian membuktikan bahwa jika proses pengeringan semakin lama maka akan proses polimerisasi semakin sempurna sehingga meningkatkan kuat

tekan geopolimer. Kandungan air yang ada pada geopolimer semakin tinggi maka kuat tekan geopolimer akan berkurang. Kandungan air dapat berasal dari larutan natrium silikat yang mengandung H_2O dan Na_2O (Winter, 1964).

Waktu optimum untuk pengeringan geopolimer adalah 28 hari. Jika waktu pengeringan kurang 28 hari, maka kuat tekan geopolimer yang dihasilkan akan lebih kecil jika dibandingkan dengan waktu pengeringan selama 28 hari. Waktu pengeringan geopolimer lebih dari 28 hari tidak berpengaruh pada suhu tekan (Panias, 2006). Faktor lain yang mempengaruhi kuat tekan pada geopolimer adalah vibrasi pada saat sintesis geopolimer. Vibrasi pada saat sintesis bertujuan untuk mengurangi gelembung-gelembung udara yang terperangkap di dalam cetakan.

2.2. Abu Layang

Abu layang adalah limbah halus yang diperoleh dari pembakaran batubara dari pembangkit listrik termal. Abu layang dikumpulkan oleh presipitator listrik atau mekanik. Abu layang umumnya lebih halus daripada semen dan terdiri dari sebagian besar partikel kaca berserat kimia kompleks seperti yang terdapat pada bahan-bahan yang mengandung mineral (Joshi dkk., 1997).

Produk yang terbentuk adalah abu layang, abu dasar dan gas atau uap selama pembakaran batubara. Abu layang adalah bagian halus dari abu yang terperangkap dalam gas buang, sedangkan abu dasar adalah residu yang terdiri dari partikel diskrit kasar atau leburan yang cukup berat untuk keluar dari zona pembakaran (ruang tungku). Uap dan gas membentuk fraksi volatilisasi dari bahan karbon yang sebagian dibuang ke atmosfer dan sebagian mengembun ke permukaan partikel abu layang. Alat pengontrol polusi seperti *scrubber* menggunakan bubur atau bubuk kapur yang digunakan untuk menangkap SO_x , isi gas buang sebelum dilepaskan ke atmosfer, terutama ketika batubara yang memiliki kadar sulfur tinggi dibakar. Jenis presipitator yang digunakan, sekitar 85

hingga 99,9 % didapat kembali dalam bentuk abu layang dan abu dasar sementara sisanya dibuang ke atmosfer. Abu layang membentuk 75 hingga 85 % dari total abu dan sisanya adalah abu dasar atau *slag*.

Sifat-sifat abu layang sangat bervariasi dan bergantung pada beberapa faktor, seperti jenis dan asal batubara (*bituminous*, *sub-bituminous* dan batu bara lignit), tingkat penghancuran batu bara, suhu nyala api, kondisi oksidasi, dan pra-perlakuan selama atau sebelum pembakaran untuk SO_x , proses pemindahan, metode pengumpulan dan penyimpanan abu layang. Spesifikasi untuk abu layang dan *pozzolan* alami mentah atau yang dikalsinasi untuk penggunaannya sebagai campuran mineral dalam beton semen Portland didefinisikan dalam ASTM C 618-89 dan CSA A266.3-79. Beberapa negara dan organisasi bahkan memiliki spesifikasi standar mereka sendiri dan persyaratan untuk abu layang yang digunakan sebagai campuran mineral atau sebagai *pozzolan*. Sesuai ASTM C 618-89, *pozzolan* didefinisikan sebagai “bahan-bahan yang mengandung silika atau mengandung silika dan alumina yang memiliki nilai semen yang sedikit atau tidak sama sekali tetapi dalam bentuk yang dibagi secara halus dan dengan adanya uap air yang secara kimia bereaksi dengan kalsium hidroksida pada temperatur biasa untuk membentuk senyawa yang memiliki sifat semen”. Ada beberapa jenis *pozzolan* yang berbeda dari definisi tersebut karena memiliki nilai semen yang signifikan.

Rincian prosedur dan bahan yang digunakan untuk pengujian sebagaimana dimaksud dalam ASTM C618-89 (Tabel 2.1) secara jelas dijelaskan dalam ASTM C-31 1 yang berjudul “*Pengambilan Sampel dan Pengujian Abu Layang untuk Digunakan sebagai Campuran dalam Beton Semen Portland*”. Uji coba abu layang secara berkala juga penting untuk menilai kualitasnya terhadap keragaman bahan, peralatan dan kondisi untuk industri konstruksi. Tingkat efisiensi pembangkit listrik tenaga batu bara juga tercermin

dalam kualitas abu layang yang dihasilkannya. Oleh karena itu, efisiensi pabrik yang lebih baik berarti mendapatkan abu layang yang lebih baik untuk digunakan dalam campuran beton.

ASTM C 618-89 mengategorikan *pozzolan* ke dalam Kelas N, F, C dan S. Kelas N mengacu pada *pozzolan* mentah atau terkalsinasi seperti tanah diatom yang berasal dari alga mikroskopik bersel satu dengan sel dinding bersilikus, serpihan opalin atau cherts, dan abu vulkanik. atau pumicites. Kelas S mengacu pada batu apung yang merupakan bentuk berpori dari kaca vulkanik. Kelas F dan C mengacu pada abu layang yang berasal dari pembakaran batu bara yang berbeda. Kelas F mengacu pada abu layang yang berasal dari pembakaran batu bara antrasit atau bitumen.

Batubara antrasit adalah batubara keras dengan rantai hidrokarbon yang mudah menguap. Batubara tersebut menghasilkan api yang kecil. Batubara bituminous di sisi lain cukup *volatile*. Kelas C mengacu pada abu yang berasal dari pembakaran batubara lignit atau sub-bituminus dan mengandung kurang dari 50 persen oksida silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3) dan besi (Fe_2O_3). Selain bersifat *pozzolan*, abu ini menunjukkan sifat semen karena mengandung silikat dan kalsium aluminat yang ditunjukkan dengan adanya kalsium oksida (CaO) lebih dari 10 persen. Lignit adalah batu bara coklat dengan tekstur seperti kayu.

Batubara *sub-bituminous* juga merupakan batubara yang lebih dominan dari batubara lignit dan bituminus dalam nilai kalor. Pembakaran batubara ini menghasilkan abu layang yang memiliki kandungan kalsium oksida dalam kisaran 8 hingga 20 bahkan lebih. Abu layang dari batubara bitumen umumnya mengandung kurang dari 5 persen kalsium oksida dan karena itu menunjukkan sedikit atau tidak ada sifat yang dapat mengeras sendiri. Silikat, aluminat dan oksida besi dalam abu layang bituminus bereaksi dengan kalsium

hidroksida yang dibebaskan dalam hidrasi semen untuk menghasilkan senyawa semen.

Tabel 2. 1 ASTM 618-89 Persyaratan Pozzolan Tipe N Digunakan Sebagai Campuran Mineral Dalam Semen Beton Portland. (*Annual Book of ASTM Standard*, 1989)

SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % minimum	70,00
SO ₃ , % maksimum	4,00
Kadar air, % maksimum	3,00
Massa yang hilang saat proses pembakaran, % maksimum	10,00
Jumlah yang ditahan pada saringan basah 45 µm, % maksimum	34,00
Indeks aktivitas <i>Pozzolan</i> pada semen Portland selama 28 hari, % control maksimum	75,00
Aktivitas <i>Pozzolan</i> dengan batu kapur, MPa minimum	5,50
Air yang dibutuhkan, % kontrol maksimum	115,00
Ekspansi atau kontraksi dari <i>Autoclave</i> , % maksimum	0,80
Berat jenis, % variasi maksimum dari rata-rata	5,00
Persen yang ditahan oleh saringan 45 µm variasi maksimum, poin persentase dari rata-rata	5,00
Persyaratan Tambahan	
Peningkatan penyusutan balok mortar pada 28 hari, % maksimum	0,03
Pengurangan ekspansi mortar pada 14 hari dalam uji ekspansi alkali, % minimum	75,00
Ekspansi mortar pada 14 hari dalam uji ekspansi alkali, % maksimum	0,02

Abu layang dari batubara lignit, yaitu, abu layang lignit umumnya akan memiliki kandungan kapur sedang

hingga tinggi mulai dari 15-30 persen, dengan demikian, mengurangi ketergantungannya terhadap kalsium hidroksida dari hidrasi semen. Abu layang lignit dapat mengeras sendiri ketika dipadatkan dalam kondisi basah. Abu layang *sub-bituminous* dengan jumlah kapur yang sedang menunjukkan sifat *self-hardening* atau *self-cementitious* dan tidak membutuhkan kalsium hidroksida dari sumber lain untuk menghasilkan senyawa semen. Abu layang yang berbeda ketika digunakan dalam campuran beton dapat diproses dengan cara berbeda. Kualitas abu mengacu pada "*intrinsic churucfer*" dari abu yang menentukan sejauh mana atau bagaimana materi dapat atau harus digunakan secara efektif. Berdasarkan konsep spesifikasi, ASTM C 618-89 dan standar relevan lainnya di berbagai negara memberikan panduan yang sangat baik untuk kualitas abu layang.

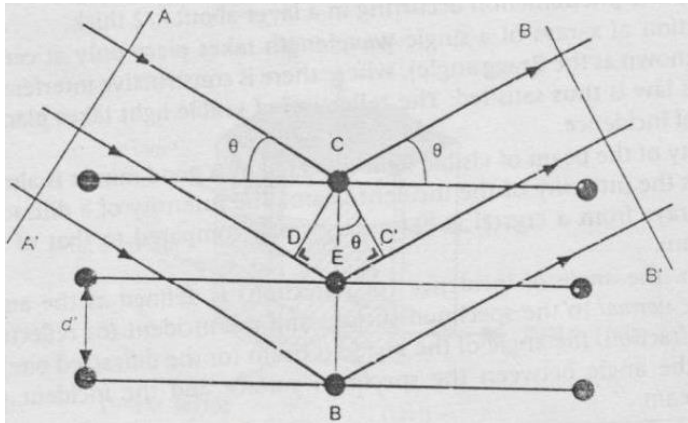
2.3. X-Rays Diffraction (XRD)

Metode karakterisasi XRD (*X-Rays Diffraction*) adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa ruah suatu sampel kristal yang bertujuan guna menentukan sifat kristal dan kristalinitas dari suatu material. Kebanyakan dari padatan berbentuk padatan kristal seperti zeolit, oksida logam dan sebagainya. XRD menjadi teknik yang cukup handal dan mendasar untuk mengevaluasi sifat-sifat fasa kristal dan ukuran kristal (Leofanti dkk., 1997) namun tidak dapat menampilkan sifat-sifat yang diperlukan untuk bahan-bahan yang bukan kristal.

Kristal memantulkan sinar X yang dikirimkan dari sumber dan diterima oleh detektor. Perubahan sudut datang sinar X menyebabkan sinar pantulan menjadi sinar spesifik yang berhubungan langsung dengan jarak antar bidang kisi (*lattice spacing*) dari kristal yang dianalisis. Pola difraksi diplotkan berdasarkan intensitas puncak yang menyatakan peta parameter kisi kristal atau indeks Miller (hkl) sebagai fungsi 2θ , dimana sudut difraksi dihitung berdasarkan persamaan Bragg (Richardson, 1989) (persamaan 2.2). Interpretasi

Hukum Bragg (Gambar 2.3) dilakukan berdasarkan asumsi bahwa permukaan dari sinar X dipantulkan adalah datar.

$$n \lambda = 2 d \sin \theta \quad (2.2)$$



Gambar 2. 3 Difraksi sinar X yang mengenai bidang kisi (Grant dan Suryanayana, 1998)

Gambar 2.3 menyatakan bahwa D merupakan jarak antar lapisan atom atau ion yang berdekatan, λ menyatakan panjang gelombang radiasi sinar X, dan n adalah urutan-urutan pantulan. Intensitas puncak pada difraktogram sinar X dapat digunakan untuk menentukan kristalinitas sampel yang dianalisis dengan persamaan (2.3) sedangkan lebar puncaknya merupakan fungsi dari ukuran partikel yang dinyatakan dalam persamaan (2.4):

$$\text{kristalinitas} = \frac{\text{intensitas puncak sampel}}{\text{intensitas puncak stnadr}} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$\text{Ukuran kristal} = \frac{K\lambda}{(B^2 - b^2)^{1/2} \cos\left(\frac{2\theta}{2}\right)} \quad (2.4)$$

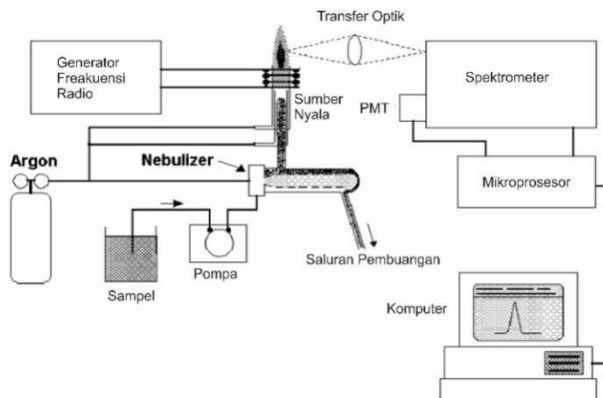
Persamaan diatas menunjukkan dimana $K = 1000$, B adalah lebar puncak untuk difraksi pada sudut 2θ , b adalah *instrument peak broadening* ($0,1^\circ$), λ adalah panjang gelombang ($0,154 \text{ nm}$), dan $(B^2 - b^2)^{1/2}$ adalah lebar puncak untuk *corrected instrumental broadening* (Richardson, 1989).

2.4. ICP / OES

ICP / OES adalah salah satu metode untuk penentuan jejak unsur dalam berbagai jenis sampel. Teknik ini didasarkan pada pancaran spontan foton dari atom dan ion yang tereksitasi dalam pelepasan RF. Sampel cairan dan gas dapat disuntikkan langsung ke instrumen, sedangkan sampel padat membutuhkan ekstraksi atau direaksikan dengan asam sehingga analit larut. Larutan sampel diubah menjadi aerosol dan diarahkan ke saluran pusat plasma. Plasma induktif ditambah (ICP) menopang suhu sekitar 10.000 K , sehingga aerosol cepat menguap. Unsur analit dibebaskan sebagai atom bebas dalam bentuk gas. Eksitasi tumbukan lebih lanjut dalam plasma memberikan energi mempromosikan mereka ke keadaan tereksitasi. Energi yang cukup untuk mengubah atom mampu ion dan kemudian mempromosikan ion ke keadaan tereksitasi. Spesi-spesi tereksitasi atomik dan ionik kemudian dapat kembali ke keadaan dasar melalui emisi foton. Foton memiliki energi karakteristik yang ditentukan oleh struktur tingkat energi terkuantisasi untuk atom atau ion. Panjang gelombang foton dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur-unsur dari mana mereka berasal. Jumlah total foton berbanding lurus dengan konsentrasi unsur asal dalam sampel (Hou dkk., 2000).

Instrumentasi yang terkait dengan sistem ICP / OES relatif sederhana. Sebagian dari foton yang dipancarkan oleh ICP dikumpulkan dengan lensa atau cermin cekung. Optik pemfokusan ini membentuk citra ICP pada celah perangkat pemilihan panjang gelombang seperti monokromator. Panjang gelombang tertentu yang keluar dari monokromator diubah menjadi sinyal listrik oleh fotodetektor. Sinyal diperkuat dan

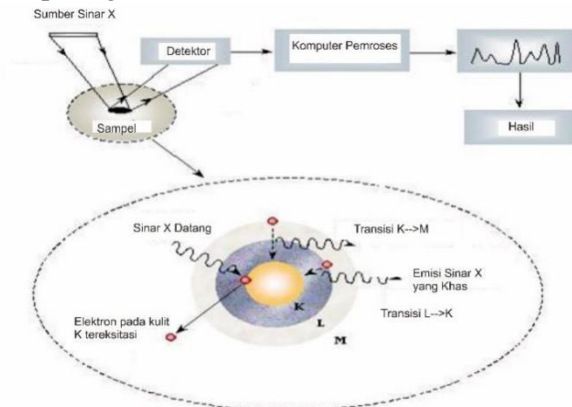
diproses oleh elektronik detektor, kemudian ditampilkan dan disimpan oleh komputer. Karakteristik ICP sebagai sumber emisi atom analitis sangat mengesankan sehingga hampir semua sumber emisi lainnya uji nyala api, *microwave induced plasma* (MIP), plasma arus searah (DCP), plasma yang diinduksi laser (LIP), dan *electric discharge* telah diturunkan ke bagian-bagian khusus yang didefinisikan secara sempit. Banyak dari bidang aplikasi awalnya digunakan untuk spektrometri serapan atom (AAS) dan spektrofotometri serapan atom grafit (GFAAS) telah diterapkan ke ICP. ICP / OES memiliki suhu atomisasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknik lain, lingkungan yang lebih inert, dan kemampuan alami untuk menentukan hingga 70 unsur. Hal ini membuat ICP kurang rentan terhadap gangguan matriks dan lebih mampu mengoreksinya ketika terjadi. Kasus di mana volume sampel tidak terbatas, ICP / OES menyediakan batas deteksi terendah, atau lebih rendah dari analisa lainnya (GFAAS), untuk hampir semua unsur. Rangkaian instrument ICP/OES ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Rangkaian instrument ICP/OES (Todoli dan Mermet, 2008)

2.5. X-Rays Fluorescence (XRF)

X-Rays Fluorescence (XRF) adalah salah satu metode analisis yang digunakan untuk menganalisis unsur dalam suatu sampel atau bahan secara kualitatif. Prinsip kerja metode analisis XRF berdasarkan terjadinya tumbukan atom-atom pada permukaan sampel oleh sinar-X dari sumber sinar-X. Hasil analisis kualitatif ditunjukkan oleh spektrum yang mewakili jenis unsur yang sesuai dengan energi sinar-X sedangkan untuk analisa kuantitatif diperoleh dengan membandingkan sampel dengan standar. Prinsip kerja XRF dijelaskan pada gambar 2.5.



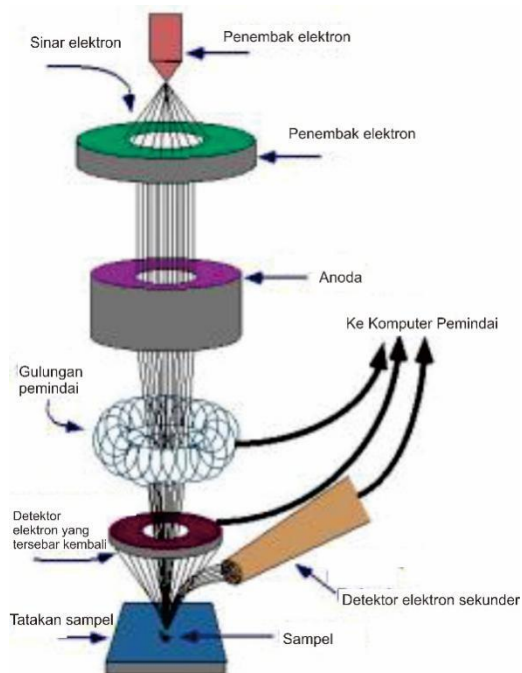
Gambar 2. 5 Prinsip Kerja XRF (Gosseau, 2009)

Matriks bahan, kondisi kevakuman dan konsentrasi unsur dalam bahan, pengaruh unsur yang memiliki energi karakteristik unsur yang dianalisis adalah faktor-faktor yang berpengaruh dalam analisis kuantitatif (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).

2.6. *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan bagian dari mikroskop elektron yang dapat menghasilkan gambar sampel dengan resolusi tinggi. Batas resolusi dari mikroskop elektron adalah 0,01-10,0 mikrometer sedangkan mikroskop elektron yang lebih kompleks memiliki batas resolusi hingga 0,005 mikrometer (Mulder, 1996).

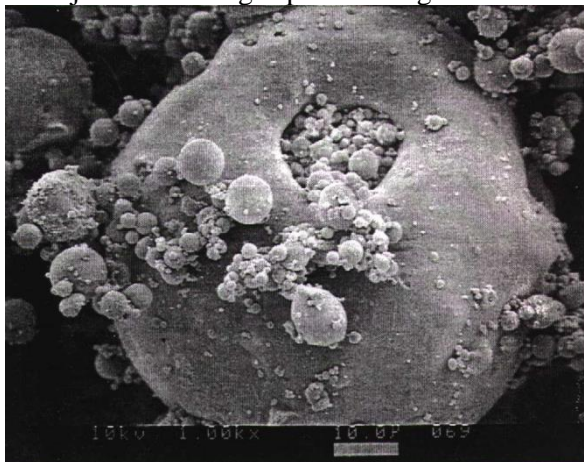
Komponen dasar penyusun SEM adalah sistem vakum, sumber berkas elektron, sistem lensa, sistem deteksi, proses sinyal, *display*, dan perekam. Sistem penyusun secara bersama menentukan hasil dan kualitas, seperti perbesaran, resolusi, kedalaman medan, dan kecerahan (Prasetyoko dkk., 2016).



Gambar 2. 6 Komponen SEM (sumber : www.iastate.edu, diakses tanggal 4 Juni 2019 pukul 05.00)

Kegunaan SEM (*Scanning Electron Microscope*) adalah untuk mengetahui morfologi atau struktur mikro permukaan dari suatu bahan atau material. Alat SEM ini juga dilengkapi dengan *detector disperse energy* (EDX) sehingga dapat digunakan untuk mengetahui komposisi elemen-elemen pada sampel yang dianalisis.

Prinsip kerja SEM adalah *scanning*. Berkas elektron diarahkan dari titik (*electron gun*) ke titik objek spesimen. Gerakan berkas elektron dari satu titik ke titik yang lain pada suatu daerah objek menyerupai gerakan membaca (*scanning*). Gambar SEM yang didapat menyatakan perbedaan unsur yang terkandung dalam bahan atau material. Terdapat warna gelap dan terang yang dihasilkan yang menunjukkan bahwa warna terang adanya unsur kimia yang memiliki nomor atom yang lebih tinggi dibandingkan warna yang gelap (Sujatno, 2015). Berikut merupakan contoh hasil SEM dari abu layang tipe C yang menunjukkan warna gelap dan terang.



Gambar 2. 7 Mikrograf abu layang tipe C (Hills, 1996)

2.7. Particle Size Analyzer (PSA)

Analisis *particle size analyzer* (PSA) digunakan untuk mengetahui distribusi ukuran dari suatu partikel. Alat ini

menggunakan metode *laser diffractions* (LAS). Terdapat beberapa metode pengukuran selain metode LAS yaitu antara lain metode ayakan (*Sieve analysis*), metode sedimentasi, analisa gambar (mikrografi), *electronical sensing zone*, dan *electron microscope*. Metode LAS digunakan 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.

2.7 Uji Kuat Tekan

Kuat 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 beton yang dihasilkan. Nilai kuat tekan beton didapat dari pengujian standar dengan benda uji yang lazim digunakan berbentuk silinder. Dimensi benda uji standar adalah tinggi 300mm dan diameter 150 mm. Tata cara pengujian yang umumnya dipakai adalah standar ASTM C39-86. Kuat tekan masing-masing benda uji ditentukan oleh tegangan tekan tinggi (f_c') yang dicapai benda uji umur 28 hari akibat beban tekan selama percobaan (Dipohusodo, 1996).

Rumus yang digunakan untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton berdasarkan percobaan dilaboratorium adalah disajikan pada persamaan (2.5).

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (2.5)$$

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

Beton mempunyai kuat tekan yang tinggi jika tersusun dari bahan lokal yang berkualitas baik. Bahan penyusun beton yang perlu mendapat perhatian adalah agregat, karena agregat mencapai 70-75% volume beton (Dipohusodo, 1996).

2.8. Penentuan Nilai 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). 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 (C₃A) dan menghasilkan presipitas

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.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

3.1. Alat dan Bahan

3.1.1. Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah labu ukur 50 dan 100 mL, oven, pengaduk kaca, Erlenmeyer 50 mL *mixer*, batang pengaduk besi, botol pp 100 mL, kertas indicator pH, pipet tetes, *plastic wrap*, kertas saring, cetakan berbentuk silinder dengan rasio diameter dan tinggi 1:2, *magnetic stirrer*, pipet ukur 1 dan 10 mL, corong plastik, ayakan 100 mesh, buret dan neraca analitik. Instrumen analisis yang digunakan untuk karakterisasi adalah mesin penguji kuat tekan (*universal testing machine*) di laboratorium beton Departemen Teknik Infrastruktur Sipil ITS; *X-Ray Diffractometer* (XRD) PANanalytical Expert, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) Zeiss EVO MA 10 dan *Inductively Coupled Plasma* (ICP) Teledyne-Leemn di Laboratorium Studi Energi ITS; *Particle Size Analyzer* (PSA) Malvern Mastersizer 2000 dan *X-Ray Fluoresence* (XRF) yang ada di Laboratorium Pusat Pembelajaran PT Semen Indonesia, Gresik.

3.1.2. Bahan

Sampel abu layang yang digunakan berasal dari tiga PLTU yaitu PLTU Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau. Selain itu digunakan larutan natrium silikat teknis (*water glass*), pelet natrium hidroksida (NaOH) p.a., HCl 37% p.a, serbuk aluminium hidroksida (Al(OH)₃) dari Merck, aqua DM, indikator pp dan indikator Metil Jingga.

3.2. Prosedur Kerja

3.2.1 Preparasi Abu Layang

Abu layang diayak menggunakan ayakan 100 mesh dan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C selama 24 jam. Abu layang yang telah dikeringkan selanjutnya

dikarakterisasi dengan XRD (*X-Ray Diffractometer*) untuk mengetahui kekristalan dan komposisi fasanya. 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*) untuk mengetahui distribusi ukuran partikel abu layang.

3.2.2 Uji Kelarutan Abu Layang

Abu layang dilarutkan ke dalam larutan NaOH 10 M dan diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 5 jam pada suhu ruang. Setelah pengadukan, filtrat dipisahkan dengan kertas saring Whatman lembaran. Filtrat kemudian dinetralkan menggunakan HCl 37% di dalam lemari asam sampai dengan pH 7 menggunakan indikator universal. Abu layang diuji menggunakan *Inductively Coupled Plasma Spectrometer* (ICP) untuk mengetahui konsentrasi unsur terlarut.

3.2.3 Pembuatan Basa Pengaktif

Larutan basa pengaktif dibuat dengan cara mencampurkan larutan NaOH 14 M dengan larutan Na₂SiO₃ (*waterglass*). Larutan NaOH dibuat dengan melarutkan 28 gram pellet NaOH ke dalam air terdemineralisasi (aqua DM) hingga volume totalnya menjadi 50 mL. Larutan tersebut kemudian didiamkan selama 24 jam. Larutan selanjutnya NaOH ditambahkan ke dalam 80 gram Na₂SiO₃ (*waterglass*) dan diaduk hingga homogen.

3.3. Sintesis Geopolimer

3.3.1. Sintesis Geopolimer Indramayu dan Sanggau

Metode sintesis geopolimer Indramayu dan Sanggau mengacu pada penelitian yang dilaporkan oleh Supriadi (2017). Pasta geopolimer dibuat dengan cara mencampurkan abu layang kering dengan suspensi Al(OH)₃ dan larutan basa pengaktif. Suspensi Al(OH)₃ dibuat dengan cara

mencampurkan 3,4 gram serbuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ dengan 24,5 mL aqua DM. Pencampuran bahan-bahan tersebut dilakukan menggunakan *mixer* selama empat menit. Pasta yang telah terbentuk selanjutnya dituangkan ke dalam cetakan berbentuk silinder dengan rasio diameter dan tinggi 1:2. Pasta yang telah dicetak kemudian didiamkan selama 24 jam. Geopolimer yang sudah mengeras lalu dikeluarkan dari cetakan kemudian dimatangkan di dalam oven selama 24 jam pada suhu 55°C .

3.3.2. Sintesis Geopolimer Asam-Asam

Sintesis geopolimer Asam-Asam dilakukan dengan metode impregnasi. Pasta geopolimer dibuat dengan mencampurkan abu layang dengan suspensi $\text{Al}(\text{OH})_3$ terlebih dahulu. Suspensi $\text{Al}(\text{OH})_3$ dibuat dengan mencampurkan 3,4 gram serbuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ dengan 50 mL aqua DM. Pencampuran larutan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dengan abu layang menggunakan *mixer* hingga homogen. Adonan tersebut selanjutnya dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu 105°C . Setelah adonan tersebut kering, larutan basa pengaktif dicampurkan dan diaduk dengan *mixer* selama empat menit hingga menjadi pasta geopolimer. Pasta geopolimer lalu dituang ke dalam cetakan dengan rasio diameter dan tinggi yaitu 1:2. Pasta yang telah dicetak kemudian didiamkan hingga mengeras. Setelah mengeras, geopolimer dimatangkan (*curing*) di dalam oven selama 24 jam pada suhu 55°C .

3.4. Karakterisasi Abu Layang dan Geopolimer

3.4.1. X-Ray Diffraction (XRD)

Analisis fasa dan kandungan mineral abu layang dari tiga sumber yang berbeda dilakukan dengan difraktometer sinar-X menggunakan PANalytical Expert yang terdapat di Laboratorium Teknik Material dan Metalurgi ITS. Analisis dilakukan dengan sinar-X dari sumber $\text{CuK}\alpha_1$ ($\lambda=1,546 \text{ \AA}$), tegangan dan arus masing-masing sebesar 40 kV dan 30 mA, laju pemindaian 2° per menit dan sudut difraksi (2θ) mulai dari $5-90^\circ$.

3.4.2. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Abu layang dari tiga sumber yang berbeda dianalisis morfologinya menggunakan SEM Zeiss EVO MA 10 yang ada di Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS. Proses *coating* Au pada ketiga sampel abu layang dilakukan sebelum analisa SEM. Mikrograf yang diperoleh dibandingkan dan dilihat secara detail bentuk dan sebaran partikelnya.

3.4.3. X-Ray Fluorescence (XRF)

Analisis XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur yang terkandung dalam abu layang menggunakan XRF di Laboratorium Pusat Pembelajaran PT Semen Indonesia, Gresik. Sampel abu layang dari ketiga sumber PLTU (Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau) disaring menggunakan ayakan berukuran 100 mesh. Abu layang yang telah disaring, dioven pada suhu 105°C selama 24 jam. Sampel abu layang diambil sebanyak 2 gram dan dicampur dengan 0,5 gram asam borat. Setelah itu, kedua campuran tersebut dibuat menjadi pelet dengan diameter 25 mm dan dilakukan uji menggunakan instrument XRF.

3.4.4. Inductively Coupled Plasma Spectrometer (ICP)

Analisis ICP pada abu layang untuk mengetahui konsentrasi unsur Si dan Al yang terlarut pada uji kelarutan abu layang. Analisis tersebut menggunakan instrument ICP Teledyne-Leeman yang ada di Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS. Sampel abu layang yang telah dilakukan uji kelarutan, dianalisis menggunakan instrument ICP-OES.

3.4.5. Uji Kuat Tekan Geopolimer

Sampel geopolimer yang telah disintesis dan berusia 7 hari, 14 hari, dan 28 hari diuji kuat tekannya menggunakan mesin penguji kuat tekan (*universal testing machine*) di Laboratorium Beton Departemen Teknik Infrastruktur Sipil ITS. Proses pengampelasan untuk meratakan bagian atas dan bawahnya dilakukan sebelum sampel geopolimer diuji kuat

tekan. Sampel geopolimer yang diuji kuat tekan berjumlah tiga untuk masing-masing sumber abu layang dan diambil data rata-ratanya. Data yang diperoleh merupakan massa beban yang diberikan kepada geopolimer dalam satuan Newton dan dikonversi ke dalam satuan MPa menggunakan persamaan (3.1).

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

f_c' = kuat tekan (MPa)
 P = Beban tekan (N)
 A = luas penampang benda uji (mm^2)

3.4.6. Standarisasi HCl

Standarisasi HCl dilakukan sebelum pengujian pH geopolimer. Standarisasi HCl dilakukan karena HCl digunakan sebagai titran untuk menentukan kebasaaan geopolimer. Standarisasi HCl dilakukan dengan dua tahap titrasi. Tahap pertama titrasi digunakan NaOH yang akan distandarisasi terlebih dahulu dengan larutan standar asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) 0,1 M yang merupakan larutan baku primer. Larutan NaOH dibuat dengan melarutkan 0,4053 gram NaOH ke dalam aquades hingga volume totalnya 100 mL. Selanjutnya, 10 mL larutan NaOH yang dihasilkan diberi indikator *fenolftalein* untuk dititrasi dengan asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) 0,1 M. Volume asam oksalat yang dibutuhkan untuk menetralkan 10 mL larutan NaOH 0,1 M dicatat dan prosedur ini diulangi sebanyak tiga kali untuk diambil nilai rata-ratanya. Konsentrasi NaOH diperoleh melalui perhitungan menggunakan persamaan (3.2).

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

Larutan NaOH yang telah distandarisasi 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 penentuan konsentrasi HCl dengan persamaan 3.3. Hal ini diulangi hingga tiga kali untuk mendapatkan nilai rata-rata.

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

3.4.7. Penentuan pH Geopolimer

Geopolimer dari tiga sumber yang berbeda dan usia yang berbeda yang telah diuji kuat tekan kemudian di tentukan nilai pH nya menggunakan metode titrasi asam-basa yang mengacu pada ASTM D 1067-92. Geopolimer dihaluskan dengan mortar dan alu. Geopolimer yang telah halus ditimbang seberat lima gram dan dilarutkan ke dalam 10 mL aquades dengan rasio berat serbuk geopolimer terhadap volume air adalah 1:2. Larutan tersebut diaduk dengan *magnetic stirrer* selama lima menit. Penyaringan untuk mendapatkan filtrat dari larutan tersebut dilakukan setelah proses pengadukan. Sebanyak 1 mL filtrat diambil dari larutan dan ditambahi dua tetes larutan indikator pp sebelum dititrasi dengan HCl 0,01 M yang telah distandarisasi. Titrasi dihentikan ketika warna larutan yang awalnya berwarna ungu berubah menjadi tidak berwarna. Lima tetes indikator Metil Jingga (MO) ditambahkan ke dalam larutan dan dilakukan titrasi kembali menggunakan HCl 0,01 M setelah larutan tak berwarna sehingga terjadi perubahan warna larutan dari kuning menjadi jingga. Volume HCl yang digunakan untuk titrasi dicatat dan dihitung dengan persamaan 3.4 sebagai konsentrasi OH⁻ dan persamaan 3.5 sebagai nilai pH. Titrasi dilakukan tiga kali dan didapatkan nilai rata-rata

$$[OH^-] = \frac{0,01 (2.V_{pn} - VT)}{V_o} \quad (3.4)$$

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

BAB IV

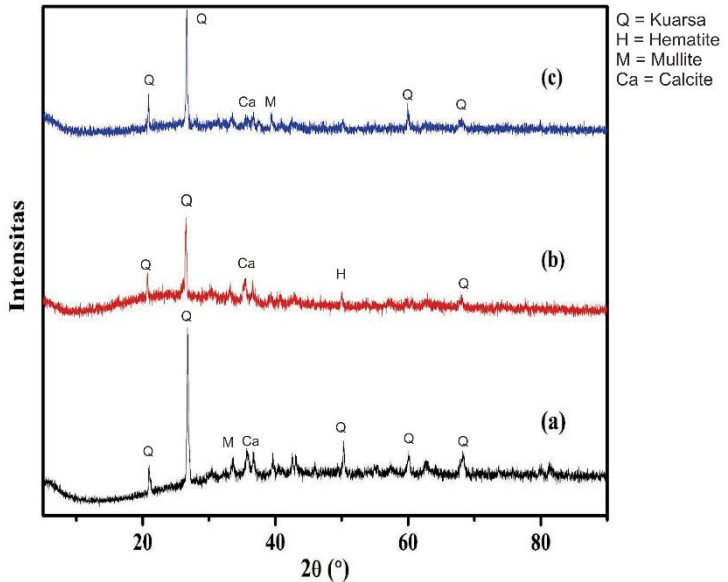
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakteristik Abu Layang

4.1.1. Komposisi Fasa Mineral dan Kekristalan

Komposisi fasa mineral dan kekristalan abu layang dikarakterisasi dengan instrumen XRD (*X-Rays Diffraction*). Komposisi fasa mineral dan kekristalan abu layang bukan faktor yang mempengaruhi kuat tekan geopolimer (Phair, 2001). Abu layang memiliki beberapa kandungan fasa yang dominan antara lain quarsa, mullite, hematite, dan calcite. Fase kristal ini bersifat inert, sedangkan fase amorf akan bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) untuk membentuk hidrat semen (Thomas, 2007). Berdasarkan hasil analisis XRD, abu layang memiliki kandungan fasa amorf dan mineral utama berupa quarsa dan mullite yang merupakan sumber utama silika dan alumina (Querol dkk., 2002). Kedua komponen ini berperan aktif dalam pembentukan ikatan dalam geopolimer (Rommel dkk., 2014). Kebanyakan fasa mullite berupa padatan kecil yang terdistribusikan secara luas dalam partikel abu layang (Wang dan Ishida, 2019).

Hasil difraktogram abu layang dari PLTU Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau ditampilkan pada Gambar 4.1. Difraktogram pada Gambar 4.1 menunjukkan pola difraksi yang relatif sama untuk puncak khas dari abu layang yang merupakan terdapat puncak khas quarsa secara berurutan di 2θ : 26,74; 26,5 dan 26,66°. Selain itu, difraktogram tersebut juga menunjukkan adanya puncak khas dari mullite dan calcite, masing-masing pada 2θ .



Gambar 4. 1 Difraktogram abu layang (a) PLTU Asam-Asam, (b) PLTU Indramayu dan (c) PLTU Sanggau

Berdasarkan difraktogram pada Gambar 4.1, abu layang PLTU Indramayu lebih amorf dibandingkan dengan abu layang yang lain. Hal tersebut terlihat dari intensitas abu layang PLTU Indramayu yang lebih rendah dibandingkan abu layang lainnya. Fasa amorf aluminosilikat yang tinggi pada abu layang secara positif mempengaruhi proses geopolimerisasi (Rozek dkk., 2018). Hanya silika dan alumina yang berfasa amorf yang dapat larut dan mempengaruhi cepat atau tidaknya proses geopolimerisasi (Xu dan Van Deventer., 2002). Difraktogram abu layang PLTU Asam-Asam (a) dan PLTU Sanggau (b) terdapat banyak puncak tajam yang menunjukkan kristalinitas yang tinggi.

Puncak-puncak tajam dan tinggi pada abu layang menunjukkan fasa kristalin yang tidak reaktif (Kusumawati dan Widiarti., 2015). Adanya fasa kristalin yang tinggi dapat

menyebabkan ikatan yang reaktif dari kelarutan silika dan alumina terbentuk tidak sempurna bahkan gagal terbentuk.

4.1.2. Komposisi Unsur Abu Layang

Analisis komposisi unsur abu layang dilakukan dengan karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF). Hasil karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) abu layang ditampilkan pada Tabel 4.1. Ketiga abu layang tersebut (PLTU Indramayu, PLTU Asam-Asam dan PLTU Sanggau) memiliki jumlah SiO_2 , Al_2O_3 , CaO dan Fe_2O_3 yang bervariasi. SiO_2 diperlukan untuk inisiasi pembentukan oligomer dan polikondensasi silikat yang meningkatkan efisiensi reaksi pembentukan jaringan geopolimer (Panias dkk., 2007), sedangkan Al_2O_3 berperan sebagai penghubung antar oligomer silikat. Secara umum kandungan aluminium dalam abu layang menentukan stabilitas jaringan geopolimer yang mempengaruhi kekuatan tekan dan daya tahan geopolimer (Tennakon dkk., 2015). Kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 dapat memberikan perbandingan Si/Al yang dapat menafsirkan kuat tekan yang maksimal. Duxson (2005) melaporkan bahwa semakin besar perbandingan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, semakin besar kuat tekan geopolimer yang dihasilkan, tetapi pada rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ tertentu kekuatannya akan berkurang sebagai akibat dari Si yang tidak bereaksi dan menyebabkan cacat dalam struktur aluminosilikat. Nilai perbandingan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dari abu layang PLTU Indramayu, PLTU Asam-Asam dan PLTU Sanggau secara berurutan yaitu 4,14, 9,15 dan 1,59. Menurut Hadi, 2008 perbandingan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 2$ dapat menghasilkan kuat tekan yang maksimum. Berdasarkan nilai perbandingan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dapat ditafsirkan bahwa geopolimer Indramayu memiliki kuat tekan lebih tinggi dari geopolimer Asam-Asam dan Sanggau. Untuk geopolimer dari abu layang PLTU Asam-Asam akan memiliki kuat tekan optimum jika perbandingan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ adalah 5,0 (Atmaja dkk., 2011).

Tabel 4. 1 Komposisi unsur abu layang hasil karakterisasi X-Ray Fluorescence (XRF)

No	Unsur	Kandungan (%)		
		PLTU Indramayu	PLTU Asam-Asam	PLTU Sanggau
1	Na ₂ O	1,310	0,138	0,563
2	MgO	3,73	6,86	5,50
3	Al ₂ O ₃	20,22	9,47	23,10
4	SiO ₂	50,55	53,35	38,09
5	P ₂ O ₅	0,133	0,069	0,187
6	SO ₃	0,318	0,713	0,471
7	K ₂ O	0,771	0,405	0,851
8	CaO	7,44	9,50	8,74
9	Sc ₂ O ₃	0,0016	0,0011	0,0015
10	TiO ₂	1,40	1,28	1,85
11	V ₂ O ₅	0,0229	0,0252	0,0412
12	Cr ₂ O ₃	0,0667	0,0601	0,0235
13	MnO	0,252	0,309	0,133
14	Fe ₂ O ₃	13,12	15,96	15,17
15	C ₃ O ₄	0,0046	0,0124	0,0086
16	NiO	0,0073	0,0171	0,0142
17	CuO	0,0049	0,0037	0,0066
18	ZnO	0,0102	0,0318	0,0127

No	Unsur	Kandungan (%)		
		PLTU Indramayu	PLTU Asam-Asam	PLTU Sanggau
19	Ga ₂ O ₃	0.0026	0.0007	0.003
20	SeO ₂	-	0,0043	0,00062
21	Br	-	0,00068	0,0023
22	Rb ₂ O	0,0038	0,002	0,0056
23	SrO	0,0654	0,0629	0,0458
24	Y ₂ O ₃	0,0043	0,003	0,0064
25	ZrO ₂	0,34	0,0229	0,0278
26	BaO	0,132	0,206	0,0904
27	Nd ₂ O ₃	0,0061	0,0048	0,0085
28	WO ₃	0,0023	-	-
29	PbO	0,0016	-	0,0024
30	CeO ₂	0,007	-	0,014
31	Nb ₂ O ₅	0,00097	-	0,0014
32	Cl	-	-	0,0513
33	GeO ₂	-	-	0,00095
34	LOI	0,38	1,49	4,98

Selain itu, pada Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa abu layang PLTU Indramayu, PLTU Asam-Asam dan PLTU Sanggau memiliki kandungan CaO secara berurutan sebesar 7,44, 9,5 dan 8,74%. Kandungan CaO tersebut menunjukkan bahwa ketiga abu layang ini merupakan jenis abu layang *low calcium*. Kandungan CaO pada abu layang ini berperan

penting dalam kuat tekan dan tahap pengerasan awal dari geopolimer. Tingginya CaO tidak hanya menyebabkan reaksi polimerisasi, tetapi menyebabkan reaksi hidrasi juga meningkatkan, sehingga kuat tekan meningkat (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).

Kandungan Fe_2O_3 pada abu layang juga bereperan penting dalam geopolimer. Berdasarkan Tabel 4.1, kandungan Fe_2O_3 pada masing-masing abu layang PLTU Indramayu, PLTU Asam-Asam dan PLTU Sanggau secara berurutan yaitu 13,12, 15,96 dan 15,17%. Abu layang Asam-Asam memiliki kandungan Fe_2O_3 paling tinggi (15,96%). Abu layang kaya besi (Fe_2O_3 atau Fe_3O_4) umumnya dihindari karena diyakini akan mengurangi kekuatan tekan geopolimer (Davidovits dkk., 2013). Hal ini disebabkan karena abu layang tersebut akan mengalami kekurangan ion hidroksida dalam pelarutan silika dan alumina, sehingga abu layang dari PLTU Asam-Asam akan menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan lebih rendah dari geopolimer yang abu layang PLTU Indramayu. Selain itu, hasil karakterisasi dengan instrumen XRF akan menghasilkan nilai LOI. Masing-masing abu layang dari abu layang PLTU Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau memiliki nilai LOI 0,38; 1,49; dan 4,98%. Nilai LOI menunjukkan lebih banyak karbon yang tidak terbakar, yang dapat mengurangi kegunaan abu layang (Bhatt dkk., 2019).

Tabel 4. 2 Klasifikasi tipe abu layang yang digunakan

Sumber Abu Layang	Kandungan (%)			Jumlah	Klasifikasi
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃		
PLTU Indramayu	50,55	20,22	13,12	83,89	Tipe F
PLTU Asam-Asam	53,35	9,47	15,96	78,78	Tipe F
PLTU Sanggau	38,09	23,1	15,17	76,36	Tipe F

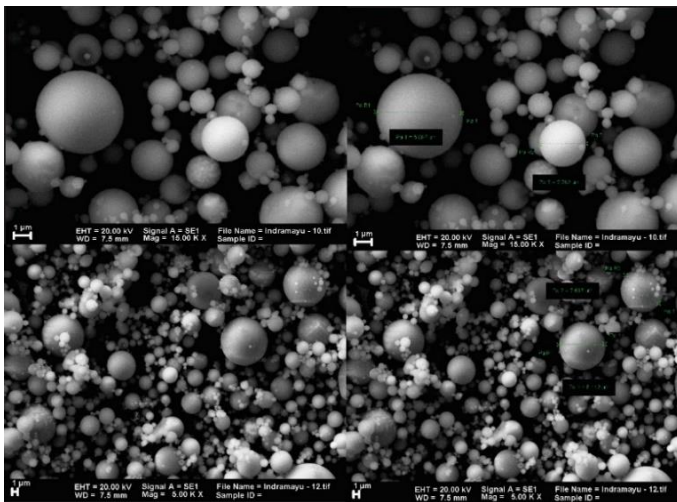
Hasil karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) dapat digunakan untuk menentukan klasifikasi abu layang dengan menjumlahkan kandungan SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃. Berdasarkan ASTM C618, abu layang dikategorikan ke dalam tipe F apabila jumlah SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 70%, sedangkan apabila jumlah SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ < 70% dikategorikan ke dalam tipe C. Semua abu layang yang digunakan dalam penelitian ini masuk ke dalam tipe F seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.2. Abu layang tipe F merupakan abu layang yang diproduksi dari pembakaran batubara anthracite atau bituminous, mempunyai sifat pozzolanic dan untuk mendapatkan sifat cementitious harus diberi penambahan *quick lime*, *hydrated lime*, atau semen (Haryanti, 2014).

4.1.3. Morfologi Abu Layang

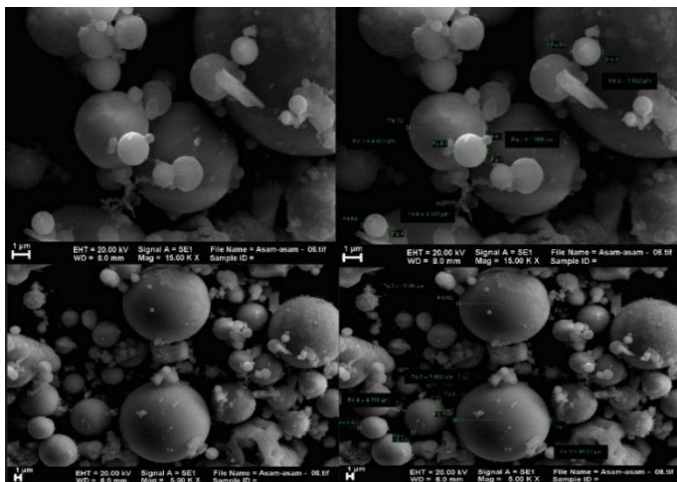
Karakterisasi SEM dilakukan untuk menentukan morfologi dari abu layang. Karakterisasi SEM juga dilakukan untuk mengetahui sebaran ukuran partikel dari abu layang. Hasil karakterisasi SEM dari abu layang ditunjukkan pada Gambar 4.2 hingga Gambar 4.4. Secara umum, ketiga abu layang memiliki bentuk morfologi bola (*spherical*). Namun bentuk morfologi abu layang PLTU Sanggau berbeda dengan

dari abu layang PLTU Indramayu dan Asam-Asam. Abu layang memiliki ukuran partikel yang heterogen karena saat melalui daerah pembakaran (*burning zone*) pada pembangkit listrik, setiap partikel batubara mengalami perubahan sifat kimia dan sifat fisika (Supriadi, 2017).

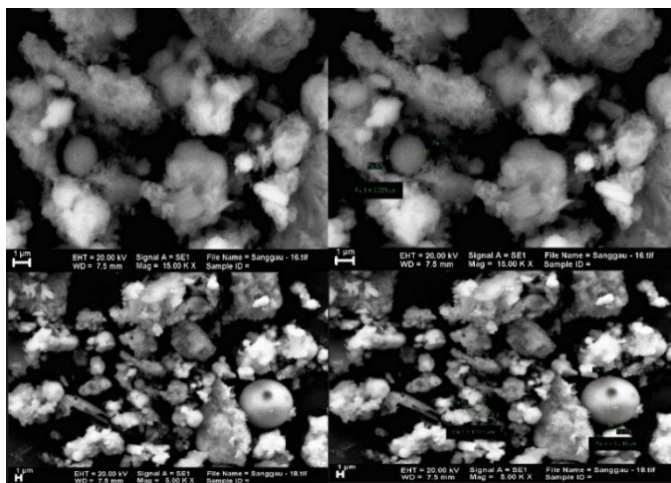
Ketiga abu layang memiliki ukuran diameter berbeda-beda. Abu layang PLTU Indramayu memiliki ukuran diameter partikel sebesar $\leq 10 \mu\text{m}$. Abu Layang PLTU Asam-Asam memiliki ukuran diameter partikel $\geq 10 \mu\text{m}$, sedangkan abu layang PLTU Sanggau memiliki ukuran partikel yang bervariasi. Ukuran dan bentuk partikel abu layang mempengaruhi kepadatan dan kekuatan tekan dari geopolimer (Gunasekara dkk., 2014). Selain itu ukuran dan bentuk partikel abu layang sangat mempengaruhi kereaktifan dalam proses geopolimerisasi. Partikel abu layang yang memiliki bentuk partikel kecil akan semakin reaktif karena memiliki luas permukaan bidang sentuh yang besar dengan pelarut. Luas permukaan bidang sentuh yang besar akan mempercepat proses geopolimerisasi (Assi dkk., 2018).



Gambar 4. 2 Mikrograf abu layang PLTU Indramayu



Gambar 4. 3 Mikrograf abu layang PLTU Asam-Asam



Gambar 4. 4 Mikrograf abu layang PLTU Sanggau

4.1.4. Distribusi Ukuran Partikel

Analisis PSA dilakukan untuk mendapatkan ukuran dan sebaran partikel pada abu layang yang digunakan pada penelitian ini. Abu layang PLTU Indramayu, PLTU Asam-Asam dan PLTU Sanggau dianalisis dengan alat *Particle Size Analyzer* Malven Mastersizer 2000. Distribusi ukuran partikel menjadi parameter penting dalam keseluruhan reaktivitas abu layang untuk sintesis geopolimer (Tennakon dkk., 2015). Hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.3 dan distribusi ukuran partikel dapat dilihat pada Gambar 4.5

Tabel 4. 3 Hasil pengukuran partikel abu layang

Ukuran (μm)	PLTU Indramayu (%)	PLTU Asam-Asam (%)	PLTU Sanggau (%)
0,5	2,59	0,79	1,47
1,0	7,03	2,07	4,47
2,0	14,01	4,57	10,59
2,5	16,78	5,74	13,51
3,0	19,29	6,81	16,33
5,0	28,30	10,45	27,00
10,0	45,38	21,17	48,11
12,18	49,42	27,01	53,99
15,0	52,35	34,87	59,27
25,0	55,82	59,48	68,76
40,0	63,60	80,75	78,76
45,0	66,85	84,74	81,76
56,0	73,71	90,46	87,33
71,0	81,41	94,52	92,96
80,0	85,05	95,94	94,89
100,0	90,99	97,87	97,97
140,0	97,18	99,56	99,97
160,0	98,64	99,87	100,00
180,0	99,47	99,99	100,00
200,0	99,84	100,00	100,00

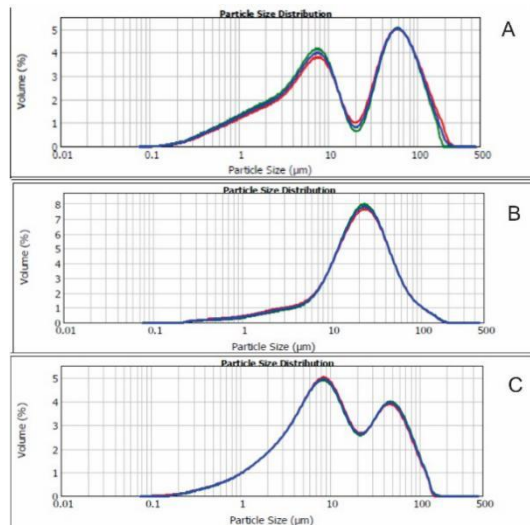
Ukuran (μm)	PLTU Indramayu (%)	PLTU Asam-Asam (%)	PLTU Sanggau (%)
224,0	99,96	100,00	100,00
250,0	100,00	100,00	100,00
280,0	100,00	100,00	100,00
300,0	100,00	100,00	100,00

Berdasarkan Tabel 4.4, abu layang PLTU Indramayu, PLTU Asam-Asam dan PLTU Sanggau mengandung partikel halus berukuran $\leq 43\mu\text{m}$ secara berurutan sebesar 63,60; 80,75 dan 78,76%. Abu layang yang mengandung partikel halus berukuran $\leq 43\mu\text{m}$ lebih dari 68,5% dapat menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan yang baik (Komljenovic dkk., 2010). Berdasarkan Tabel 4.4, abu layang PLTU Sanggau memiliki kehalusan yang lebih tinggi dari kedua abu layang yang lain. Hal ini ditunjukkan ketika ukuran partikel lebih kecil dari $160\mu\text{m}$, abu layang PLTU Sanggau sudah mencapai 100%. Kehalusan partikel dapat meningkatkan luas permukaan sehingga terjadi ikatan antara komponen abu layang dengan larutan basa pengaktif yang mempengaruhi laju dari geopolimerisasi (Assi dkk., 2018 dan Hadi dkk., 2018). Selain itu, abu layang dengan partikel yang lebih halus memiliki kereaktifan yang tinggi sehingga dapat meningkatkan kekuatan tekannya (Xiao, 2017).

Tabel 4. 4 Distribusi ukuran partikel abu layang (μm)

Sumber Abu Layang	Diameter (μm)			Luas Permukaan (m^2/g)
	10 (d_{10})	50 (d_{50})	90 (d_{90})	
PLTU Indramayu	1,39	12,60	98,99	0,467
PLTU Asam-Asam	4,74	20,74	54,84	0,205
PLTU Sanggau	1,90	10,63	62,64	0,380

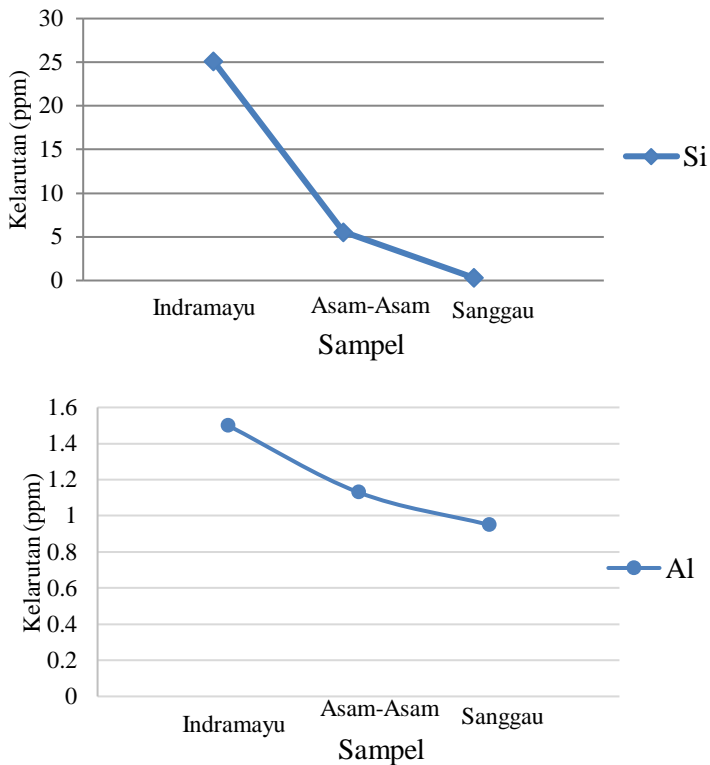
Besar diameter partikel yang terdapat dalam abu layang juga mempengaruhi proses geopolimerisasi dan kuat tekan dari geopolimer yang dihasilkan. Penelitian yang telah dilakukan oleh Sari (2018) menyatakan bahwa partikel abu layang yang besar dengan presentase yang tinggi akan membuat abu layang sulit larut dengan sempurna dalam larutan basa pengaktif dan mempengaruhi kuat tekannya. Berdasarkan Tabel 4.4, abu layang PLTU Indramayu memiliki diameter paling besar dan paling banyak diantara abu layang yang lain. Abu layang PLTU Indramayu diperkirakan akan sulit bereaksi serta memiliki kuat tekan yang rendah dibandingkan abu layang PLTU Asam-Asam dan PLTU Sanggau. Namun pada mikrograf SEM, abu layang PLTU Indramayu memiliki bentuk partikel bulat (*spherical*) dengan ukuran diameter partikel tersebar $\leq 10 \mu\text{m}$ yang berjumlah banyak sehingga meningkatkan nilai kelarutan Si dan Al dan mudah membentuk ikatan pada proses geopolimerisasi.



Gambar 4. 5 Distribusi ukuran partikel abu layang PLTU (A) Indramayu, (B) Asam-Asam dan (C) Sanggau.

4.1.5. Kelarutan Si dan Al

Uji kelarutan dilakukan pada suhu ruang menggunakan larutan NaOH 10 M dan diaduk dengan *magnetic stirrer* selama lima jam. Hasil ekstrapolasi uji kelarutan Si dan Al ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan hasil uji kelarutan abu layang dalam larutan NaOH ditunjukkan pada Tabel 4.5.



Gambar 4. 6 Kelarutan Si dan Al pada abu layang PLTU Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau

Nilai kelarutan Si dan Al berbeda-beda pada setiap abu layang (Gambar 4.6). Hal tersebut disebabkan karena aluminium dan silika memiliki kereaktifan yang berbeda terhadap larutan NaOH (Atmaja dkk., 2011). Penggunaan konsentrasi larutan NaOH dapat mempengaruhi kelarutan Si dan Al. Semakin tinggi konsentrasi larutan NaOH untuk melarutkan abu layang, semakin tinggi juga jumlah kelarutan Si dan Al yang dihasilkan (Goni dkk., 2003). Namun jika penggunaan konsentrasi larutan NaOH terlalu tinggi akan menyebabkan terganggunya reaksi geopolimerisasi karena banyaknya ion OH^- yang menyebabkan reaksi tidak efisien. Oleh karena itu, hasil uji kelarutan dapat menjadi indikator kemampuan abu layang untuk bereaksi selama proses geopolimerisasi. Tabel 4.5 menunjukkan bahwa kelarutan Si dan Al tertinggi yaitu masing-masing 25,14 ppm dan 1,5 ppm yang didapatkan pada abu layang dari PLTU Indramayu.

Tabel 4. 5 Hasil pengukuran uji kelarutan

No	Nama Sampel	Si (ppm)	Al (ppm)
1	Indramayu	25,14	1,5
2	Asam-Asam	5,54	1,13
3	Sanggau	0,32	0,95

4.2. Sintesis Geopolimer

Sintesis geopolimer diawali dengan pembuatan basa pengaktif terlebih dahulu. Larutan basa pengaktif merupakan campuran larutan Na_2SiO_3 (*waterglass*) dengan larutan NaOH. Pendiaman larutan selama enam jam dilakukan karena pelarutan NaOH merupakan reaksi eksoterm yang menimbulkan panas. Larutan NaOH juga bereaksi dengan CO_2 di udara sehingga proses pendiaman bertujuan untuk menstandarkan kondisi larutan NaOH sebelum digunakan dalam pembuatan basa pengaktif.

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. 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. (Fatmawati dan Fansuri., 2014; Samantasighar dan Singh., 2018).

Konsentrasi NaOH berperan penting dalam pengembangan kuat tekan geopolimer, karena proses geopolimerisasi membutuhkan alkali yang kuat untuk mengaktifkan Si dan Al dari abu layang (Hameed dkk., 2017). Penambahan silikat terlarut dalam fasa cair sehingga nilai SiO_2 dan Na_2O dapat masuk ke polikondensasi pada tahap awal (Panias dkk., 2007). Hal tersebut juga untuk membantu proses geopolimerisasi yang baik dibutuhkan. Na_2SiO_3 (*waterglass*) berperan sebagai *binder* atau pengikat sumber aluminosilikat. Ion-ion silikat yang terkandung dalam Na_2SiO_3 (*waterglass*) 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 awal pada struktur geopolimer.

Secara keseluruhan larutan basa pengaktif sangat penting dalam geopolimerisasi karena membantu melepaskan $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ kemudian molekul air dari hidrolisis 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 sintesis geopolimer PLTU Indramayu dan Sanggau mengacu pada penelitian Supriadi (2017). Metode pada penelitian Supriadi (2017) diterapkan untuk sintesis geopolimer Asam-Asam akan menyebabkan terjadinya retakan pada geopolimer usia 14 hari dan 28 hari. Hal tersebut disebabkan penyebaran ion Al pada abu layang tidak merata sempurna sehingga reaksi geopolimerisasi tidak berjalan sempurna juga. Hasil pengamatan selama sintesis geopolimer dari ketiga sumber yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 4.6. Tabel 4.6 memperlihatkan bahwa waktu *setting* untuk masing-masing geopolimer berbeda-beda. Perbedaan waktu *setting* ini disebabkan oleh perbedaan rasio silika dan alumina sehingga perbandingan kandungan Na_2SiO_3 (*waterglass*) dan NaOH yang ditambahkan tidak sesuai dengan abu layang yang digunakan (Satria dkk., 2016). Perbedaan kandungan ion Kalsium pada abu layang juga mempengaruhi waktu *setting* geopolimer (Nguyen dkk., 2016).

Tabel 4. 6 Hasil pengamatan pada pembuatan geopolimer

No	PLTU Sumber Abu Layang	Waktu <i>Setting</i>	Keterangan
1	Indramayu	24 jam (1 hari)	Kental, pasta berwarna coklat muda dan mudah dicetak
2	Asam-Asam	48 jam (2 hari)	Agak encer, pasta berwarna abu-abu dan timbul 2 lapisan pada

			geopolimer
3	Sanggau	-	Adonan menggumpal sehingga pasta tidak terbentuk dan tercium bau ammonia pada adonan

Proses pencetakan dan pemeraman pasta geopolimer dari dua sumber abu layang yang berbeda-beda ditunjukkan pada Gambar 4.7. Geopolimer berbahan dasar abu layang PLTU Asam-Asam terbentuk dua lapisan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Lapisan pertama berwarna abu-abu yang dimana sesuai dengan warna abu layang PLTU Asam-Asam. Lapisan kedua (diatas lapisan pertama) berwarna hitam pekat berbentuk gel. Lapisan tersebut diindikasikan sebagai kandungan karbon pada abu layang dan mudah dipisahkan dari lapisan pertama dengan ketebalan sekitar 1 cm. Kandungan karbon pada geopolimer akan memberikan alkalinitas yang rendah sehingga menghasilkan kuat ikatan yang rendah dalam matriks (Koshy dkk., 2019). Gel tersebut harus dihilangkan untuk memaksimalkan kekuatan geopolimer. Berbeda dengan geopolimer abu layang PLTU Asam-asam, geopolimer berbahan abu layang PLTU Indramayu berwarna coklat, sama dengan warna abu layangnya.



Gambar 4. 7 Proses pencetakan dan pemeraman pasta geopolimer pada cetakan silinder dengan abu layang (A) Indramayu dan (B) Asam-Asam



Gambar 4. 8 Geopolimer dari abu layang PLTU Asam-Asam

Abu layang PLTU Sanggau tidak berhasil disintesis dikarenakan karakteristik abu layang yang kurang reaktif yang dapat dilihat dari bentuk partikel abu layang Sanggau yang tidak beraturan. Pencampuran abu layang dengan larutan basa pengaktif tidak dapat menjadi pasta geopolimer. Adonan abu layang PLTU Sanggau ditunjukkan pada Gambar 4.9. Adonan geopolimer abu layang PLTU Sanggau tidak membentuk pasta melainkan menggumpal dan tercium bau ammonia ketika dicampurkan dengan larutan basa pengaktif. Faktor lain yang menyebabkan kegagalan pada sintesis geopolimer dari PLTU Sanggau adalah adanya kandungan karbon yang tidak terbakar pada abu layang yang ditunjukkan pada nilai LOI (*Loss of Ignition*). Nilai LOI merupakan ukuran untuk kandungan karbon yang tidak terbakar yang terkandung dalam abu layang (Elmrabet dkk., 2019). Peningkatan nilai LOI dapat mengurangi kualitas abu layang karena dapat membatasi penerapan abu layang sebagai bahan dasar geopolimer serta mempengaruhi daya tahan geopolimer (Bhatt dkk., 2019). Nilai LOI pada abu layang PLTU Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau secara berurutan yaitu 0,38; 1,49; dan 4,98% dengan nilai LOI paling tinggi adalah abu layang PLTU Sanggau.



Gambar 4. 9 Adonan abu layang PLTU Sanggau yang tidak dapat menjadi pasta

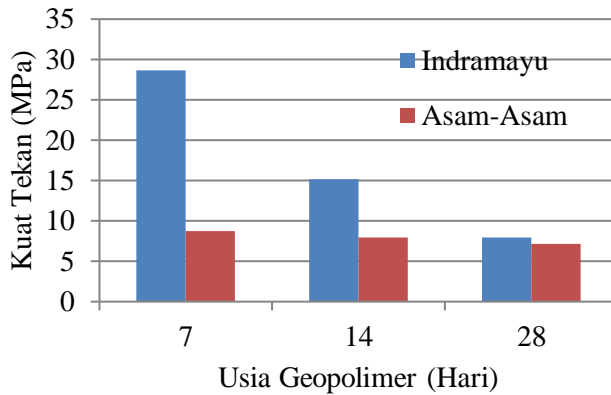
Pemeraman dilakukan dalam proses pembuatan geopolimer untuk memfasilitasi reaksi awal geopolimerisasi. Geopolimerisasi terjadi ketika aluminosilikat dilarutkan dan membebaskan $[\text{SiO}_4]^-$ dan $[\text{AlO}_4]^-$ di bawah suasana basa. Unit tetrahedral secara alternatif terkait dengan prekursor polimer dengan berbagi atom oksigen, sehingga membentuk ikatan Si-O-Al-O (Singh dkk., 2015). Setelah geopolimer mencapai *final setting*, geopolimer dikeluarkan dari cetakan dan dilakukan proses *curing*. *Curing* dilakukan untuk memfasilitasi reaksi lanjutan geopolimerisasi abu layang sehingga kuat tekan meningkat (Ferdy, 2010). Dalam penelitian Kumar (2016) menyatakan bahwa suhu *curing* berada pada kisaran 40 hingga 85°C untuk reaksi geopolimerisasi yang sempurna Selain itu, *curing* juga dapat mencegah timbulnya retakan pada geopolimer, menjaga perbedaan suhu geopolimer dengan lingkungan sekitar, dan juga meningkatkan kuat tekan. Geopolimer dibungkus dengan

plastik untuk mengurangi penguapan selama *curing* berlangsung hingga pengujian kuat tekan dilakukan (Ekaputri, 2007).

4.3. Kuat Tekan Geopolimer

Pengukuran kuat tekan dilakukan pada geopolimer yang telah berusia 7 hari, 14 hari dan 28 hari. Umur geopolimer dihitung mulai dari geopolimer setelah melalui proses *curing*. Pengukuran kuat tekan yang dilakukan sesuai dengan acuan yang tertulis di dalam SNI 1974 tahun 2011 (Badan Standardisasi Nasional, 2011) untuk pengujian beton. Pengukuran kuat tekan dihentikan hingga umur 28 hari karena jika lebih dari 28 hari tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan (Hardjito dkk., 2004).

Geopolimer disiapkan dengan meratakan permukaan atas dan bawah 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. Umur geopolimer berpengaruh terhadap kuat tekannya dimana semakin lama umur geopolimer, semakin tinggi kuat tekannya karena pembentukan rantai C-A-S-H (Calcium-aluminosilikat-hidrat) dalam geopolimer semakin panjang (Mushlihah, 2008). Data yang diperoleh dari kuat tekan berupa masa beban yang dapat ditanggung oleh sebuah geopolimer dengan satuan Mpa. Hasil kuat tekan geopolimer disajikan pada Gambar 4.10 dan data rata-rata hasil kuat tekan disajikan pada Tabel 4.7. Kuat tekan geopolimer dari abu layang PLTU Sanggau tidak ada karena geopolimer tidak dapat terbentuk.



Gambar 4. 10 Hasil pengukuran kuat tekan geopolimer

Tabel 4. 7 Rincian data kuat tekan geopolimer

Nama Sampel	Kuat Tekan (Mpa)		
	Usia Geopolimer		
	7 hari	14 hari	28 hari
Indramayu	28,66	15,13	9,56
Asam-Asam	8,76	7,96	7,17

Hasil pengukuran kuat tekan (Tabel 4.7) menunjukkan bahwa kekuatan terendah diperoleh adalah 7,17 MPa yang terjadi pada geopolimer dari abu layang PLTU Asam-Asam umur 28 hari sedangkan kuat tekan tertinggi didapatkan sebesar 28,66 MPa yaitu pada geopolimer dari abu layang dari PLTU Indramayu berusia 7 hari. Kesimpulan dari kedua geopolimer dari abu layang PLTU Indramayu dan Asam-Asam yaitu semakin lama umur geopolimer, maka semakin turun kuat tekannya.

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi besar kecilnya kuat tekan geopolimer yaitu komposisi abu layang, nilai kelarutan Si dan Al pada abu layang, morfologi abu layang, jenis abu layang yang digunakan dan kandungan karbon yang tidak terbakar pada abu layang. Hal ini dibuktikan oleh geopolimer dari abu layang PLTU Indramayu memiliki kuat tekan terbaik karena memiliki rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 2$ (rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,65$), memiliki bentuk partikel yang bulat dan berukuran kecil ($\leq 10 \mu\text{m}$), serta kandungan karbon yang tidak terbakar yang kecil dibandingkan abu layang PLTU Asam-Asam dan PLTU Sanggau. Faktor lain yang mempengaruhi kekuatan tekan geopolimer adalah proses pengamplasan permukaan geopolimer. Proses pencetakan menyebabkan permukaan dan ketinggian geopolimer yang tidak rata. Perlakuan pengamplasan diperlukan untuk meratakan permukaan dan menyeragamkan tinggi geopolimer-geopolimer yang akan diujikan.

4.4. Penentuan pH Geopolimer

Pengujian pH digunakan sebagai parameter penting untuk menunjukkan tingkat alkalinitas suatu geopolimer dalam kondisi yang berbeda. Metode pengujian pH mengacu pada standar ASTM 1067-02. Berdasarkan penelitian Behnood (2016), pH geopolimer berada di rentang 12,5-13. Tabel 4.8 menunjukkan pH pada setiap umur geopolimer.

Tabel 4. 8 Nilai pH pada setiap umur geopolimer

Nama Sampel	pH		
	Usia Geopolimer		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
Indramayu	12.21	12.16	12.09
Asam-Asam	12.91	12.83	12.86

Tabel 4.8 menunjukkan bahwa nilai pH geopolimer yang dihasilkan memenuhi standar ($\text{pH} = 12,5-13$). Terjadi penurunan pH pada semua sampel 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.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

Geopolimer yang berhasil disintesis adalah geopolimer berbahan baku abu layang PLTU Indramayu dan PLTU Asam-Asam. Hasil kuat tekan geopolimer dari abu layang PLTU Indramayu adalah 28,66; 15,13 dan 9,56 MPa untuk masing-masing umur 7, 14 dan 28 hari. Hasil kekuatan tekan geopolimer dari PLTU Asam-Asam adalah 8,76; 7,98 dan 7,17 MPa untuk masing-masing umur 7, 14 dan 28 hari. pH geopolimer PLTU Indramayu dan PLTU Asam-Asam berada pada rentang 12,09-12,93 yang sama dengan pH dari mortar semen PC.

Sifat-sifat abu layang yang sangat mempengaruhi sifat geopolimer antara lain morfologi abu layang, komposisi unsur abu layang dan nilai LOI. Bentuk morfologi abu layang yang menghasilkan geopolimer dengan sifat yang baik adalah berbentuk bulat (*spherical*) dan memiliki ukuran partikel ≤ 10 μm . Rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam abu layang untuk menghasilkan geopolimer dengan sifat yang baik berada pada rentang 2,65-5,63. Nilai LOI abu layang untuk menghasilkan geopolimer bersifat baik, berada pada rentang 0,38-1,49.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- 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 Geopolymers Concrete. *Construction and Building Materials*, 167, 372-380.
- ASTM D 5759-95. (1989). 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.
- Atmaja, L., Fansuri, H., dan Maharani, A. (2011). Crystalline Phase Reactivity in the Synthesis of Fly Ash-Based Geopolymers. *Indonesian Journal of Chemistry*, 11 (1), 90 – 95.
- Badan Standardisasi Nasional (1989) SNI 03-0349:1989. Bata Beton untuk Pasangan Dinding. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Beckhoff, B., Kanggieber, B., Langhoff, N., Wedell, R., dan Wolff, H. (2006). Handbook of Practical X-Ray Fluorosense 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.

- Bhatt, A., Priyadarshini, S., Mohanakrishnan, A. A., Abri, A., Sattler, M., dan Techapaphawit, S. (2019). Physical, Chemical, and Geotechnical Properties of Coal Fly Ash: A Global Review. *Case Studies and Construction Material*
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994). Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Material and Education*, 16, 91-139.
- Dipohusodo, I. (1996). *Manajemen Proyek dan Kontruksi* (I ed.). Yogyakarta: Kanisius.
- Ekaputri, J. J., Ulum, M. B., dan Triwulan. (2007). Karakteristik Fisik dan Kimia Fly Ash dari Perusahaan *Ready Mix* Beton dan Limbah Pabrik terhadap Sifat Mekanik Pasta dan Mortar. *Jurnal Sains POMITS*
- Elmabret, R., Harfi A. E., dan Youbi, M. S. E. (2019). Study of Properties of Fly Ash Cements. *Materials Today: Proceedings*, 13, 850–856
- Falcone, J.S. (1982). *Soluble Silicates*. Washington: American Chemical Society
- 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 Cr^{3+} pada Geopolimer Berbahan Baku Abu Layang PT. IPMOMI. *Jurnal Sains POMITS*, 1(1), 1-8.

- Ferdy. (2010). Pengaruh Temperatur dan Waktu *Curing* Terhadap Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang. Skripsi. Universitas Indonesia : Depok.
- Fernandez-Jimenez, A., Macphee, D. E. & Lachowski, 2005. Immobilization of Cesium in Alkaline Activated Fly Ash Matrix. *Journal Nuclear Material*, 346, 185-193.
- Goñi, S., Guerrero, A., Luxán, M.P., Macías, A. (2003). Activation of the Fly Ash *Pozzolanic* Reaction by Hydrothermal Conditions. *Cement Concrete Research*, 33, 1399–1405.
- Gosseau. (2009). Principles of X-Rays Fluorosence., Vol 1-2. Moscow: Qrium.
- 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 Charateristic and Alkaline Activator Components on Compressive Strenght of Fly Ash-Based Geopolimer Mortar. *Construction and Building Materials*, 175, 41-54.
- Hameed, A.M., Rawdhan, R.R., dan Al-Mishhadani, S.A. (2017). Effect of Various Factors on the

- Manufacturing of Geopolimer 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 Geopolymers. *4th International Conference on Process Engineering and Advanced Materials*, 148, 189-193.
- 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.
- Haryanti, N. H., (2014). Uji Abu Terbang PLTU Asam Asam sebagai Bahan Pembuatan Bata Ringan. *Jurnal Fisika FLUX*, 11(2), 129-139.
- Hill, R., & Daugherty, K. (1996). The Interaction of Calcium Nitrate and a Class C Fly Ash During Hydration. *Cement and Concrete Research*, 26(7), 1131–1143.
- Hou, X. & Jones, B.T. (2000). Inductively Coupled Plasma / Optical Emission Spectrometry, *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, 9468-9485.
- James, P.M.S. (1991). Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis. Cambridges: Cambridge University Press.
- Joshi, R. C., Lohtia, R. P. (1997). Fly Ash in Concrete: Production, Properties and Uses. Amsterdam: CRC Press.
- 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.
- Komljenovic, M., Bascarevic, Z. & Bradic, V. (2010). Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash Geopolymers. *Journal. Hazardous. Material*.
- 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.
- 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.
- Kumar, S., Djobo, J. N. Y., Kumar, A., dan Kumar, S. (2016). Geopolymerization Behaviour of Fine Iron-Rich Fraction of Brown Fly Ash. *Journal of Building Engineering*, 8. 172–178
- Kusumawati, E., dan Widiarti, N. (2015). Sintesis Geopolimer Berbusa Berbahan Dasar Abu Layang Batu Bara dengan Hidrogen Peroksida sebagai Foaming Agent. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 13(1), 17-28.
- Leofanti, G., Tozzola, G., Padovan, M., Petrini, G., Bordiga, S., & Zecchina, A. (1997). Catalyst Characterization:

- Characterization Techniques. *Catalysis Today*, 34(3-4), 307–327.
- Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). Structure and Properties of Clay-based Geopolymers cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629.
- Mulder, M. (1996). *Basic Principles of Membran Technology*. Dordrecht: Kluwer Academic.
- 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.
- Nguyen, K. T., Ahn, N., Le, T. A., & Lee, K. (2016). Theoretical and Experimental Study on Mechanical Properties and Flexural Strength of Fly Ash Geopolymers Concrete. *Construction and Building Materials*, 106, 65–77.
- Nugroho, P. (2018). Kinetika Leaching Ion Logam Berat Pb^{2+} pada Geopolimer Berbasis Abu Layang PT. IPMOMI. Surabaya: Departemen Kimia.
- 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.
- Prasad, B., Mondal, K.J. (2008). Heavy Metals Leaching in Indian Fly Ash. *Journal of Enviromental Science and Engineering*, 50(2), 127-132.

- Prasetyoko, D., Fansuri, H., Nikmah, Y. L. & Fadlan, A., (2016). Karakterisasi Struktur Padatan. Kaliurang, Yogyakarta: Deepublish.
- 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.
- Richardson, J.T. (1989). Principles of Catalyst Development. New York: Plenum Press.
- Risdanareni, P., Puspitasari, P., dan Jaya, E.J. (2017). Chemical and Physical Characterization of Fly Ash as Geopolymer Material. *ETIC 2016*.
- 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).
- 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.
- 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.
- Sari, D.K. (2018). Kajian Karakteristik Kimia dan Fisika Abu Layang yang Menjadi Penentu Kekuatan Mekanik Perikat Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang.

Surabaya: Departemen Kimia, Fakultas Ilmu Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Satria, J., Sugiarto, A., Antoni., Hardjito, Dj. (2016). Karakteristik Beton Geopolimer Berdasarkan Variasi Waktu Pengambilan Fly Ash. Universitas Kristen Petra.
- Shi C., Fernandez-Jimenez A., Palomo A., (2011). New Cements for the 21st Century: The Pursuit of an Alternative to Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 41, 750-763.
- Singh, B. G. I., Gupta, M. & Bhattacharyya, S. K., 2015. Geopolymers Concrete: A Review of Some Recent Development. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- Sujatno, A., Salam, R., Dimiyati, A., (2015). Studi Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk Karakterisasi Proses Oksidasi Paduan Zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir*, 9 (1).
- Supriadi, W. (2017). Amobilisasi Kation-Kation Logam Berat Menggunakan Geopolimer dari Abu Layang. Surabaya: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Suryanarayana, C., Grant Norton, M. (1998). X-Ray Diffraction: A Practical Approach. New York dan London: Plenum Press
- Tennakon, C., Sagoe-Crentsil, K., Nicolas, R.S., dan Sanjayan, J. (2015). Charateristic of Australian Brown Coal Fly

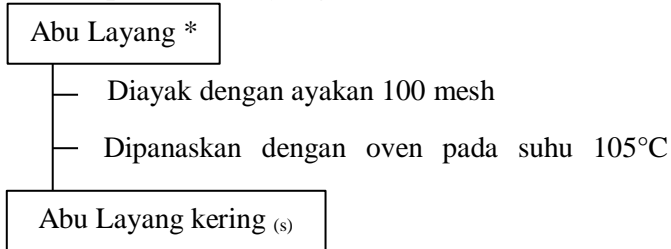
- Ash Blended Geopolymers. *Construction and Building Materials*, 101, 396-409.
- Thomas, M. (2007). Optimizing the Use of Fly Ash Concrete. *Portland Cement Association*.
- Todoli, J. L., Mermet, J. M. (2008). Liquid Sample Introduction in ICP Spectrometry: A Practical Guide. Amsterdam: Elsevier.
- van Deventer J. S. J., Provis J. L., Duxon P., Lukey G. C. (2007). Reaction Mechanisms in the Geopolymeric Conversion of Inorganic Waste to Useful Products. *Journal of Hazardous Materials*, 139, 506-513.
- Winter, George. (1964). Design of Concrete Structures. New York: McGraw-Hill
- 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*. China: IOP Publishing.
- Xu, H., dan Van Deventer, J.S.J. (2002). Geopolymerization of Multiple Minerals. *Mineral Engineering*, 15, 1131-1139

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

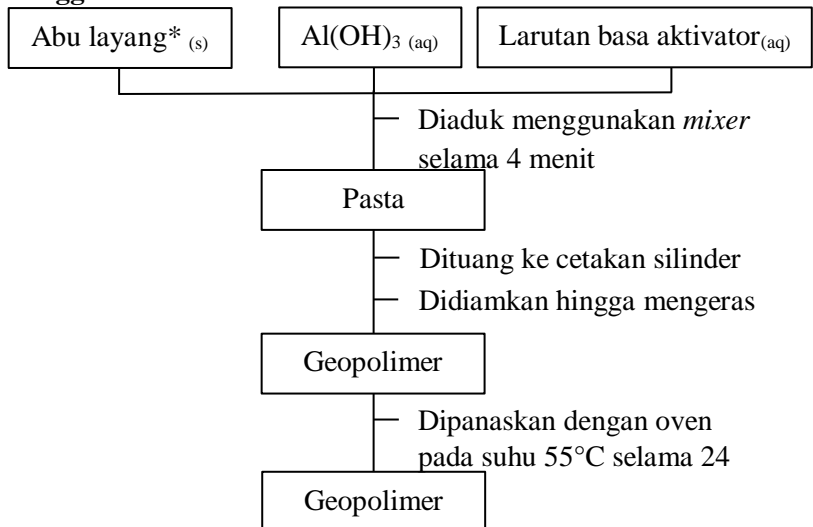
LAMPIRAN A: SKEMA KERJA

1. Preparasi abu layang

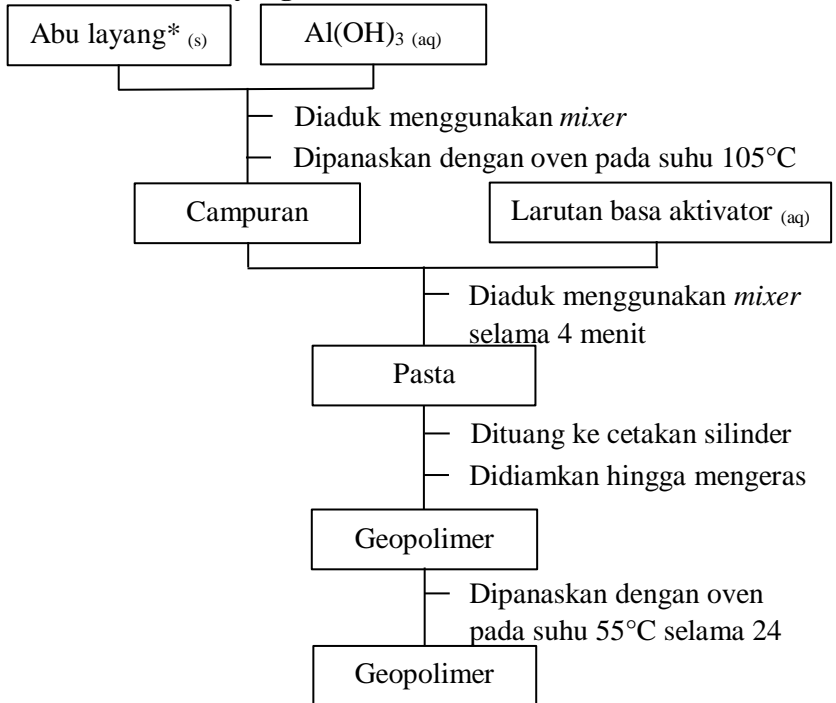


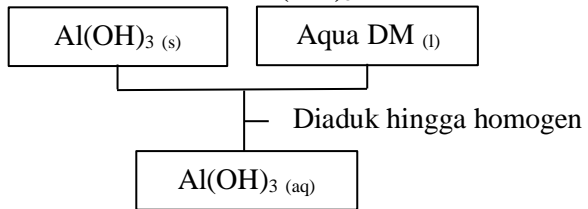
* : Abu layang Indramayu, Asam-asam, atau Sanggau

2. Sintesis abu layang PLTU Indramayu dan PLTU Sanggau



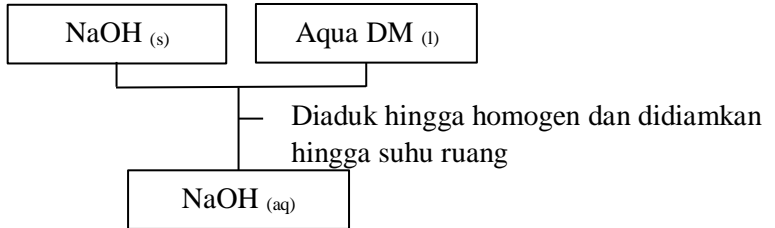
3. Sintesis abu layang PLTU Asam-Asam



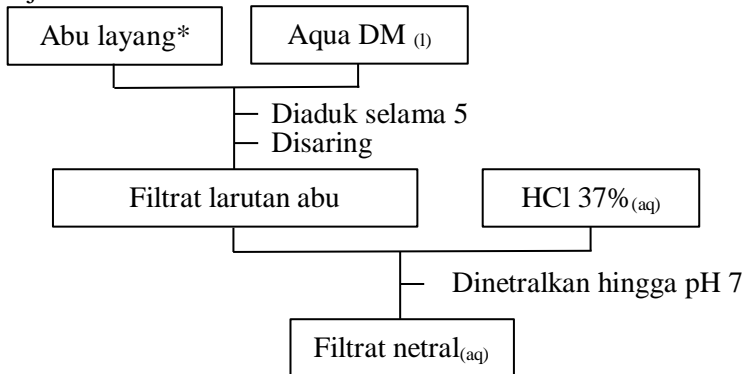
4. Pembuatan larutan Al(OH)_3 

5. Uji kelarutan Si dan Al

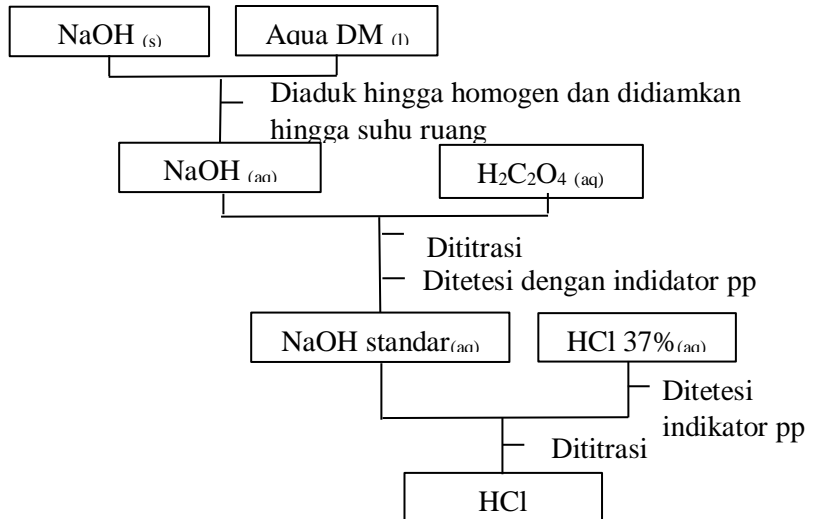
(a) Pembuatan larutan NaOH 10 M



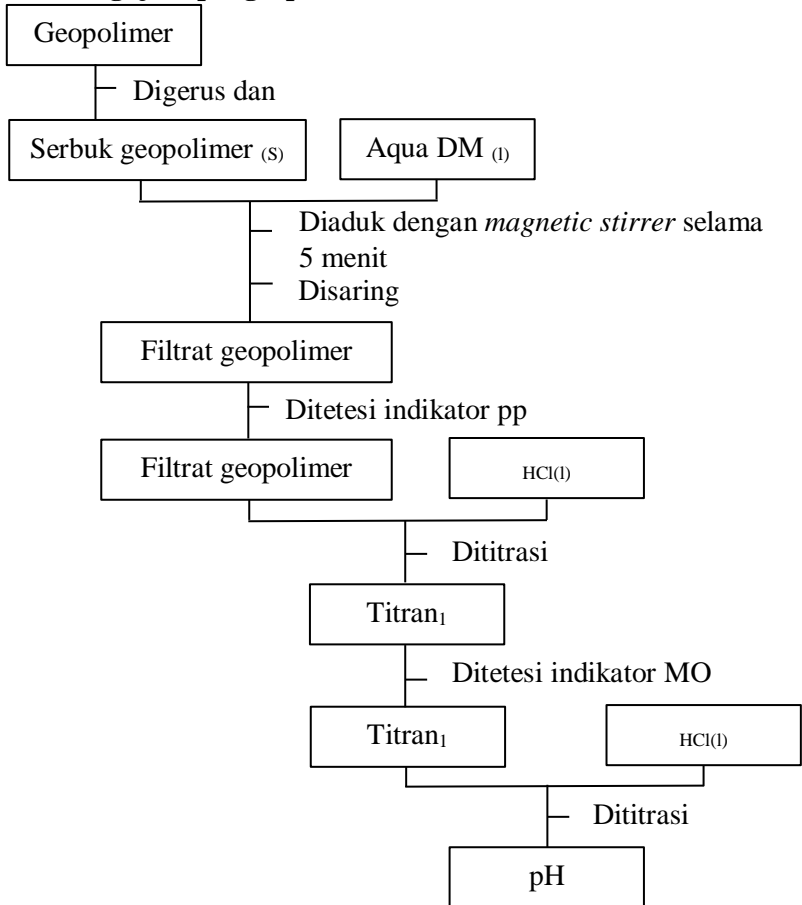
(b) Uji kelarutan Si dan Al



6. Standarisasi HCl



7. Pengujian pH geopolimer



LAMPIRAN B : PERHITUNGAN

1. Pembuatan larutan NaOH 0,1 M

$$\begin{aligned} \text{Mr NaOH} &= 40 \text{ g/mol} \\ \text{M NaOH} &= \frac{n \text{ NaOH}}{V} \\ 0,1 \text{ M} &= \frac{n \text{ NaOH}}{0,1 \text{ L}} \\ n \text{ NaOH} &= 0,01 \text{ mol} \\ n \text{ NaOH} &= \frac{\text{massa NaOH}}{\text{Mr NaOH}} \\ 0,01 \text{ mol} &= \frac{\text{massa NaOH}}{40 \text{ g/mol}} \\ \text{Massa NaOH} &= 0,4 \text{ gram} \end{aligned}$$

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

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

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

4. Penentuan pH geopolimer

(a) Geopolimer PLTU Indramayu

Umur	VPN (mL)	VT (mL)	[OH ⁻]	pOH	pH	pH rata-rata
	10,5	4,5	0,0165	2,217	12,20	
7 Hari	10,0	4,5	0,0155	1,809	12,19	12,21
	11,2	5,5	0,0169	1,772	12,23	
	12,5	7,5	0,0175	1,757	12,24	
14 Hari	13,0	8,0	0,0180	1,930	12,07	12,18
	12,0	7,0	0,0170	1,769	12,23	
	10,0	6,3	0,0125	1,905	12,10	
28 Hari	11,0	9,0	0,0118	1,930	12,07	12,09
	10,0	5,0	0,0136	1,866	12,13	

(b) Geopolimer Asam-Asam

Umur	VPN (mL)	VT (mL)	[OH ⁻]	pOH	pH	pH rata-rata
	45	9	0,081	1,915	12,90	
7 Hari	48	8	0,088	1,555	12,94	12,91
	45	9	0,081	1,915	12,90	
	36	10	0,062	1,208	12,79	
14 Hari	37	8	0,066	1,180	12,81	12,83
	43	11	0,075	1,125	12,88	
	42	10	0,074	11,308	12,87	
28 Hari	42	11	0,073	11,267	12,86	12,86
	41	11	0,071	11,487	12,85	

Perhitungan kuat tekan geopolimer

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:

$$f_c' = \frac{P}{A}$$

f_c' adalah kuat tekan (MPa)

P adalah beban tekan geopolimer (Newton)

A adalah luas penampang geopolimer (m^2)

Penampang geopolimer berbentuk lingkaran sehingga digunakan

rumus luas lingkaran, dengan rumus:

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

$$\pi = 3,14$$

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

	Sampel	
	PLTU Indramayu	PLTU Asam-Asam
7 Hari (N)	11000	2000
	12000	2000
	4000	4000
	9000	3000
14 Hari (N)	11000	2000
	2000	3000
	4000	2000
	2000	4000
28 Hari (N)	2000	2000
	4000	2000
	2000	3000
	4000	3000

$$f_c' = \frac{P}{A} = \frac{11000}{3,14 \times 10^{-4}} = 35,03$$

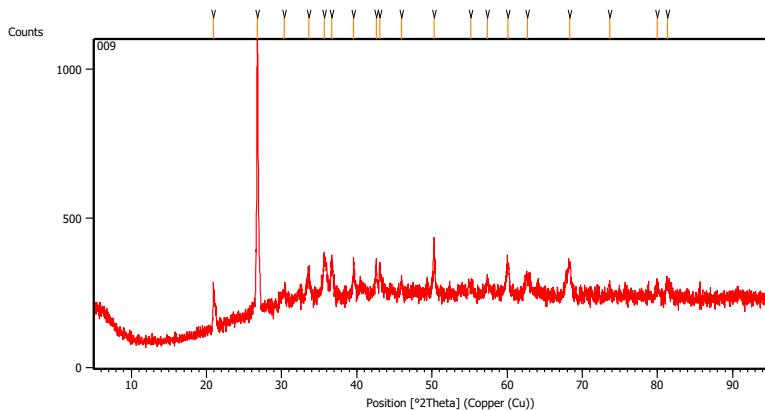
Perhitungan diatas akan didapatkan hasil kuat tekan dari geopolimer yang berusia 7, 14 dan 28 hari.

	Sampel	
	PLTU Indramayu	PLTU Asam-Asam
7 Hari (MPa)	35,03	6,37
	38,21	6,37
	12,74	12,74
	28,66	9,55
Rata-Rata	28,66	8,76
14 Hari (MPa)	35,03	3,18
	6,37	9,55
	12,74	6,37
	6,37	12,74
Rata-Rata	15,13	7,96
28 Hari (MPa)	6,37	6,37
	12,74	6,37
	6,37	6,37
	12,74	9,55
Rata-Rata	9,56	7,165

LAMPIRAN C: HASIL KARAKTERISASI ABU LAYANG

1. Analisis XRD

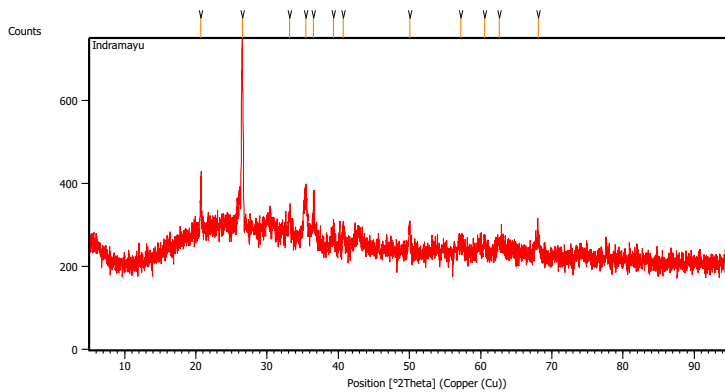
(a) Abu layang PLTU Asam-Asam



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.9321	146.03	0.0669	4.24401	17.84
26.7496	818.31	0.1506	3.33277	100.00
33.6253	79.95	0.5353	2.66536	9.77
35.6779	128.49	0.2676	2.51659	15.70
36.6971	112.46	0.2676	2.44900	13.74
39.5808	111.37	0.1338	2.27697	13.61
42.5875	96.14	0.1673	2.12292	11.75

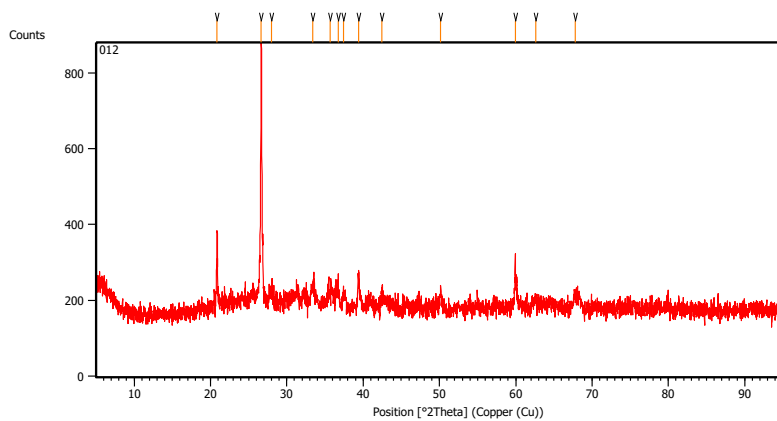
43.0646	96.29	0.1338	2.10050	11.77
45.9316	49.95	0.2007	1.97584	6.10
50.2595	151.58	0.1338	1.81538	18.52
60.1498	97.93	0.3346	1.53839	11.97
62.6883	53.56	0.5353	1.48206	6.54
68.3056	110.31	0.3346	1.37324	13.48
81.3161	47.14	0.5353	1.18325	5.76

(b) Abu layang PLTU Indramayu



Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	FWHM Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
20.7244	128.64	0.0836	4.28607	30.44
26.5302	422.58	0.1338	3.35984	100.00
33.1479	49.11	0.2007	2.70265	11.62
35.4772	103.92	0.2007	2.53036	24.59
36.5582	109.55	0.1004	2.45799	25.92
50.0595	61.59	0.2007	1.82216	14.58
68.0886	49.15	0.2676	1.37708	11.63

(c) Abu layang PLTU Sanggau



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
20.8739	207.40	0.0669	4.25571	31.14
26.6640	665.99	0.1004	3.34328	100.00
36.7510	49.74	0.4015	2.44553	7.47
37.4637	42.14	0.3346	2.40063	6.33
39.3819	77.92	0.1673	2.28801	11.70
50.1163	41.62	0.2676	1.82023	6.25
59.9507	145.22	0.0612	1.54175	21.80

2. PSA (Particle Size Analyzer)

(a) Abu layang PLTU Indramayu



Result Analysis Report

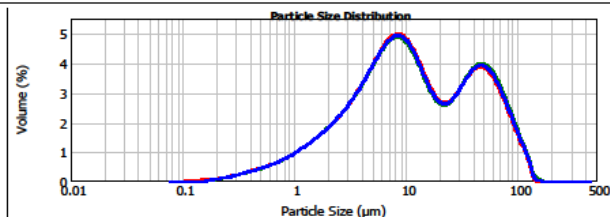
Sample Name: FA SANGGAU - Average
Sample Source & type:
Sample bulk lot ref:

SOP Name: Cement OPC
Measured by: MALVERN INSTRUMENTS

Measured: Thursday, February 21, 2019 10:53:39 AM
Analysed: Thursday, February 21, 2019 10:53:41 AM

Particle Name: Cement OPC Particle Rt: 1.860 Dispersant Name:	Accessory Name: Solrocco 2000 Absorption: 0.1 Dispersant Rt: 1.000	Analysis mode: General purpose (fine) Size range: 0.020 to 2000.000 μm Weighted Residual: 0.394 %	Sensitivity: Normal Obscuration: 4.18 % Result Emulation: On
Concentration: 0.0007 %Vol Specific Surface Area: 0.38 m^2/g	Span: 5.715 Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.328 μm	Uniformity: 1.69 Vol. Weighted Mean D[4,3]: 22.826 μm	Result units: Volume

$d(0.1): 1.901 \mu\text{m}$
 $d(0.5): 10.829 \mu\text{m}$
 $d(0.9): 62.643 \mu\text{m}$



— FA SANGGAU, Thursday, February 21, 2019 10:53:39 AM
 — FA SANGGAU, Thursday, February 21, 2019 10:53:52 AM
 — FA SANGGAU - Average, Thursday, February 21, 2019 10:53:39 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 %
0.500	1.47	10.000	41.11	53.000	85.36	140.000	92.97	355.000	100.00	600.000	100.00
1.000	4.47	12.181	53.99	56.000	87.33	150.000	100.00	400.000	100.00	1000.000	100.00
1.046	4.76	15.000	59.27	63.000	90.13	160.000	100.00	425.000	100.00	1120.000	100.00
1.487	7.48	20.000	64.32	71.000	92.69	180.000	100.00	460.000	100.00	1180.000	100.00
1.509	7.55	25.000	69.76	75.000	92.75	200.000	100.00	500.000	100.00	1250.000	100.00
1.505	7.59	32.000	73.55	80.000	94.80	212.000	100.00	560.000	100.00	1400.000	100.00
1.716	8.88	36.000	76.21	90.000	96.69	224.000	100.00	600.000	100.00	1600.000	100.00
2.000	10.59	38.000	77.50	100.000	97.97	250.000	100.00	630.000	100.00	1700.000	100.00
2.398	12.51	40.000	78.76	105.000	98.54	280.000	100.00	710.000	100.00	1800.000	100.00
3.000	16.33	45.000	81.76	112.000	99.00	300.000	100.00	800.000	100.00	2000.000	100.00
5.000	27.00	50.000	84.47	125.000	99.71	315.000	100.00	850.000	100.00		

Operator notes:

(b) Abu layang PLTU Asam-Asam



MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

Sample Name:
FA ASAM-ASAM - Average
Sample Source & type:

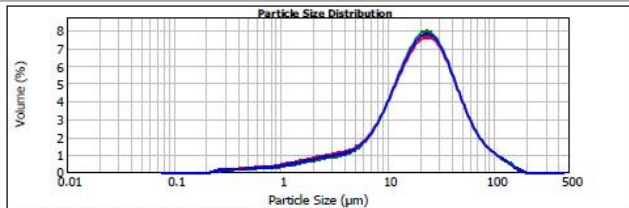
Sample bulk lot ref:

SOP Name:
Cement OPC
Measured by:
MALVERN INSTRUMENTS

Measured:
Thursday, February 21, 2019 10:50:33 AM
Analysed:
Thursday, February 21, 2019 10:50:35 AM

Particle Name: Cement OPC	Accessory Name: Scirocco 2000	Analysis model: General purpose (fine)	Sensitivity: Normal
Particle Rt: 1.860	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 μm	Obscuration: 3.81 %
Dispersant Name:	Dispersant Rt: 1.000	Weighted Residual: 0.248 %	Result Emulation: On
Concentration: 0.0011 %Vol	Span : 2.415	Uniformity: 0.768	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.205 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3.2]: 8.020 μm	Vol. Weighted Mean D[4.3]: 26.895 μm	

d(0.1): 4.740 μm d(0.5): 20.743 μm d(0.9): 54.839 μm



— FA ASAM-ASAM, Thursday, February 21, 2019 10:50:33 AM
— FA ASAM-ASAM, Thursday, February 21, 2019 10:50:44 AM
— FA ASAM-ASAM - Average, Thursday, February 21, 2019 10:50:33 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 %
0.500	0.79	10.000	21.17	53.000	89.22	140.000	99.56	365.000	100.00	900.000	100.00
1.000	2.07	12.500	27.01	56.000	90.46	150.000	99.76	400.000	100.00	1000.000	100.00
1.046	2.18	15.000	34.87	63.000	95.71	160.000	99.87	425.000	100.00	1120.000	100.00
1.487	3.29	20.000	46.18	71.000	94.52	180.000	99.89	460.000	100.00	1180.000	100.00
1.500	3.32	25.000	52.48	75.000	96.22	200.000	100.00	500.000	100.00	1250.000	100.00
1.656	3.33	32.000	71.52	80.000	98.94	212.000	100.00	550.000	100.00	1400.000	100.00
1.715	3.87	36.000	75.64	90.000	97.00	224.000	100.00	600.000	100.00	1600.000	100.00
2.000	4.57	38.000	78.81	100.000	97.87	250.000	100.00	630.000	100.00	1700.000	100.00
2.500	5.74	40.000	82.75	106.000	98.25	280.000	100.00	710.000	100.00	1800.000	100.00
3.000	6.81	46.000	84.74	112.000	98.58	300.000	100.00	800.000	100.00	2000.000	100.00
5.000	10.46	50.000	87.70	125.000	99.12	315.000	100.00	850.000	100.00		

(c) Abu layang PLTU Sanggau



Result Analysis Report

Sample Name: FA SANGGAU - Average
Sample Source & type: Cement OPC
Sample bulk lot ref:

SOP Name: Scirocco 2000
Measured by: MALVERN INSTRUMENTS

Measured: Thursday, February 21, 2019 10:53:39 AM
Analyzed: Thursday, February 21, 2019 10:53:41 AM

Particle Name: Cement OPC
Particle Rt: 1.860
Dispersant Name:

Concentration: 0.0007 %Vol
Specific Surface Area: 0.38 m²/g

Accessory Name: Scirocco 2000
Absorption: 0.1
Dispersant Rt: 1.000

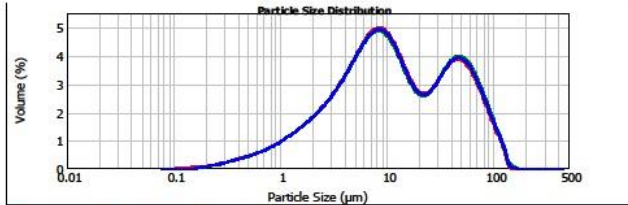
Span : 5.715
Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.329 um

Analysis mode: General purpose (fine)
Size range: 0.020 to 2000.000 um
Weighted Residual: 0.394 %

Uniformity: 1.69
Vol. Weighted Mean D[4,3]: 22.826 um

Sensitivity: Normal
Obscuration: 4.18 %
Result Emulation: On
Res. units: Volume

d(0.1): 1.901 um d(0.5): 10.629 um d(0.9): 62.643 um



—FA SANGGAU, Thursday, February 21, 2019 10:53:39 AM
 —FA SANGGAU, Thursday, February 21, 2019 10:53:52 AM
 —FA SANGGAU - Average, Thursday, February 21, 2019 10:53:39 AM

Size (um)	Vol Under %	Size (um)	Vol Under %	Size (um)	Vol Under %	Size (um)	Vol Under %	Size (um)	Vol Under %
0.500	1.47	10.000	48.11	50.000	85.96	140.000	99.97	365.000	100.00
1.000	4.47	12.181	53.99	56.000	87.33	150.000	100.00	400.000	100.00
1.546	4.76	15.000	59.37	63.000	90.13	160.000	100.00	425.000	100.00
1.467	7.40	20.000	64.92	71.000	92.93	180.000	100.00	460.000	100.00
1.500	7.56	25.000	68.76	75.000	93.75	200.000	100.00	500.000	100.00
1.505	7.59	32.000	73.55	80.000	94.89	210.000	100.00	550.000	100.00
1.716	8.88	38.000	75.21	90.000	95.69	250.000	100.00	600.000	100.00
2.000	10.59	38.000	77.50	100.000	97.97	250.000	100.00	630.000	100.00
2.500	13.51	40.000	78.76	106.000	98.54	280.000	100.00	710.000	100.00
3.000	15.33	46.000	81.76	112.000	99.00	300.000	100.00	800.000	100.00
5.000	27.00	50.000	84.47	125.000	99.71	315.000	100.00	850.000	100.00

Operator notes:

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di kabupaten Jember, 13 September 1996, ba'da solat Jumat. Penulis merupakan anak keempat dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Jember Kidul III (2003-2009), SMPN 1 Jember (2009-2012), dan SMAN 2 Jember (2012-2015). Penulis diterima di Departemen Kimia FS-ITS Surabaya melalui jalur SNMPTN pada tahun 2015 dan terdaftar dengan NRP 01211540000017. Di Departemen Kimia ini, penulis mendalami bidang geopolimer pada Laboratorium Kimia Material dan Energi di bawah bimbingan Bapak Hamzah Fansuri, M.Si, Ph.D. (h.fansuri@chem.its.ac.id). Penulis sempat aktif di Himpunan Mahasiswa Kimia ITS (HIMKA-ITS) sebagai *staff* Departemen Dalam Negeri periode 2016/2017, *staff Chemistry Week 8* tahun 2016, Koordinator Sie Transkamjin *Chemistry Week 9* tahun 2017, aktif di acara ITS EXPO 2017 sebagai *Staff Ahli* sie Konsep Kreatif tahun 2017 dan Kepala Departemen Dalam Negeri Himpunan Mahasiswa Kimia ITS (HIMKA ITS) periode 2017/2018. Penulis dapat dihubungi melalui email bayuirwin@gmail.com atau no HP 089682185598