



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**SKRIPSI**

**PENGARUH NATRIUM SILIKAT TERHADAP  
PERCEPATAN GEOPOLIMERISASI ABU LAYANG  
BERKADAR KALSIMUM RENDAH**

**DADANG**

**NRP. 012 1 15 4000 0071**

**Dosen Pembimbing**

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

**DEPARTEMEN KIMIA**

**FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2020**



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**SCRIPT**

**THE EFFECT OF SODIUM SILICATE TO  
ACCELERATE THE GEOPOLYMERIZATION  
PROCESS FROM LOW CALSIUM FLY ASH**

**DADANG**

**NRP. 012 1 15 4000 0071**

**Supervisor:**

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

**DEPARTEMENT OF CHEMISTRY**

**FACULTY OF SCIENCE AND DATA ANALYTICS**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2020**

**PENGARUH NATRIUM SILIKAT TERHADAP  
PERCEPATAN GEOPOLIMERISASI ABU LAYANG  
BERKADAR KALSIUM RENDAH**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Sains  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Kimia  
Fakultas Sains dan Analitika Data  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya

Oleh:

**DADANG**

**NRP. 01211540000071**

**DEPARTEMEN KIMIA  
FAKULTAS SAINS DAN ANALITIKA DATA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020**

**LEMBAR PENGESAHAN  
PENGARUH NATRIUM SILIKAT TERHADAP  
PERCEPATAN GEOPOLIMERISASI ABU LAYANG  
BERKADAR KALSIMUM RENDAH  
SKRIPSI**

Oleh:

**DADANG**

**NRP. 01211540000071**

Surabaya, 3 Februari 2020

Menyetujui,  
Dosen Pembimbing



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

**NIP. 19691017 199412 1 001**



Mengetahui,  
Kepala Departemen Kimia

**Prof. Dr. rer. nat. Fredy Kurniawan, S.Si., M.Si**

**NIP. 19740428 199802 1 001**

# **PENGARUH NATRIUM SILIKAT TERHADAP PERCEPATAN GEOPOLIMERISASI ABU LAYANG BERKADAR KALSIMUM RENDAH**

**Nama : DADANG**  
**NRP : 0121154000071**  
**Departemen : Kimia**  
**Pembimbing : Prof. Hamzah Fansuri, M.Si., Ph. D**

## **ABSTRAK**

Abu layang merupakan limbah B3 dari proses pembakaran industri yang telah dimanfaatkan sebagai bahan baku geopolimer oleh ilmuwan. Proses pembakaran dalam industri yang berbeda menghasilkan jenis abu layang yang berbeda. Salah satu faktor penting yang membedakannya adalah kandungan kalsium. Abu layang tinggi kalsium memiliki kuat tekan stabil dan cukup tinggi namun *setting time*-nya terlalu cepat sehingga bermasalah ketika dipakai dalam pembuatan proyek infrastruktur, sedangkan abu layang rendah kalsium memiliki *setting time* yang relatif lama namun juga gagal membentuk pasta geopolimer. Abu layang yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari PT. Wilmar, PLTU Ketapang dan PLTU Sanggau yang merupakan abu layang rendah kalsium. Metode yang digunakan berdasar pada penelitian Faradila pada tahun 2019 dalam pembuatan geopolimer. Abu layang dikarakterisasi dengan FTIR, XRF, PSA, XRD, Bomb Kalorimeter sedangkan geopolimer yang terbentuk diuji dengan uji kuat tekan dan *vicat test*. Kekuatan geopolimer diuji pada usia 7 hari setelah proses *curing*. Hasil optimal didapatkan pada penambahan 32% (m/m)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan *setting time* 30 - 64 jam dan kuat tekan mencapai 21,62 MPa.

**Keywords:** Geopolimer, abu layang, boiler, rendah kalsium, kuat tekan, FTIR, XRF, PSA

# **THE EFFECT OF SODIUM SILICATE TO ACCELERATE THE GEOPOLYMERIZATION PROCESS FROM LOW CALSIUM FLY ASH**

**Name : DADANG**  
**NRP : 0121154000071**  
**Department : Kimia**  
**Supervisor : Prof. Hamzah Fansuri, M.Si., Ph. D**

## **ABSTRACT**

Fly ash is a B3 waste from industrial combustion processes that have been used as raw material for geopolymers by scientists. Combustion processes in different factories produce different types of fly ash. Calcium is one important factor that make it different. High calcium fly ash has a stable and high compressive strength, but the setting time is too fast so it is problematic when used in making infrastructure projects. Meanwhile, low calcium fly ash has a relatively long setting time but also fails to form geopolymer paste. The fly ash used in this study was taken from PT. Wilmar, PLTU Ketapang and PLTU Sanggau which are low calcium fly ash. The method used is based on Faradila's research in 2019 in making geopolymers. Fly ash was characterized by FTIR, XRF, PSA, XRD, Bomb Calorimeter while the geopolymers formed were tested by compressive strength and vicat tests. Geopolymer strength was tested at 7 days after curing. Optimal results obtained at the addition of 32% (m/m)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  with a setting time of 30-64 hours and compressive strength reaches 21.62 MPa.

**Keywords:** Geopolymer, fly ash, boiler, low calcium, compressive strength, FTIR, XRF, PSA

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “**PENGARUH NATRIUM SILIKAT TERHADAP PERCEPATAN GEOPOLIMERISASI ABU LAYANG BERKADAR KALSIUM RENDAH**”. Penulis dengan penuh kerendahan hati, ingin berterimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pengarahan selama pengerjaan penelitian geopolimer.
2. Bapak Prof. Dr. rer. nat. Fredy Kurniawan S.Si., M.Si, selaku Kepala Departemen Kimia atas fasilitas yang telah diberikan hingga naskah Skripsi ini dapat terselesaikan.
3. Ibu Dra. Ratna Ediati, M. Si., Ph. D. Selaku dosen wali yang telah membimbing selama saya kuliah di Kimia ITS.
4. Bapak Dr. Djoko Hartanto, M.Si, selaku kepala Laboratorium Kimia Material dan Energi yang telah memberikan fasilitas selama pengerjaan tugas akhir.
5. Kedua orang tua kandung dan orang tua angkat, serta saudara yang tiada henti memberi dukungan, doa, dan semangat.
6. M. Luthfi Hardiawan, Rochmatun Annisa dan Atikah S. Ishlah selaku Presiden BEM ITS, Sekretaris Kabinet I dan Sekretaris Kabinet II yang selalu mendukung penulis dari awal hingga akhir.
7. Teman-teman Zlintud – Team, BPH dan Kabinet Dinamis Menginspirasi HIMKA ITS 2017-2018, Keluarga Konsep Kreatif ITS EXPO, Kabinet Kolaborasi BEM ITS 2019, GOLDSCHMIDT Kimia ITS 2015 dan saudara-saudara di warung kopi Katalis maupun warung lainnya yang selalu mendukung hingga terselesaikannya skripsi ini.

8. Keluarga Mahasiswa ITS dan seluruh rakyat Indonesia yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, 7 Januari 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vi
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
BAB II .....	7
TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1 Abu Layang .....	7
2.2 Basa Pengaktif .....	8
2.3 Geopolimer .....	9
2.4 <i>X-Ray Fluoresence (XRF)</i> .....	11
2.5 <i>Particle Size Analyzer (PSA)</i> .....	11
2.6 <i>Fourier Transfor Infra Red (FTIR)</i> .....	13
2.7 Bomb Kalorimeter .....	14
2.8 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i> .....	15
2.9 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i> .....	18
2.10 Kuat Tekan .....	20
2.11 <i>Setting-time Geopolymer</i> .....	23
BAB III .....	25
METODOLOGI .....	25
3.1 Alat dan Bahan .....	25
3.1.1 Alat .....	25
3.1.2 Bahan .....	25
3.2 Prosedur kerja .....	26
3.2.1 Karakterisasi Abu Layang .....	26
3.2.2 Pembuatan Geopolimer .....	27

3.2.3	Karakterisasi Geopolimer .....	29
BAB IV	.....	31
HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	31
4.1	Karakteristik Abu Layang .....	31
4.1.1	Hasil Penampakan Abu Layang .....	31
4.1.2	Komposisi Abu Layang .....	32
4.1.3	Ukuran Partikel Abu Layang .....	35
4.1.3	Gugus Fungsi Ikatan Partikel Abu Layang .....	36
4.1.4	Kandungan Kalori pada Abu Layang.....	38
4.1.5	Komposisi Fasa Mineral dan Kekristalan .....	39
4.1.6	Morfologi Abu Layang .....	41
4.2	Karakteristik Geopolimer yang dihasilkan .....	44
4.2.1	Kuat Tekan.....	47
4.3.2	Uji <i>Setting time</i> .....	52
BAB V	.....	57
PENUTUP	.....	57
5. 1	Kesimpulan .....	57
5.2	Saran .....	57
DAFTAR PUSTAKA	.....	59
LAMPIRAN	.....	71
BIODATA PENULIS	.....	79

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kategori Struktur Geopolimer (Davidovits, 1994).....	8
Gambar 2.2	Distribusi ukuran partikel metakaolin dan semen Portland (Siddique dan Khan, 2011)..	11
Gambar 2.3	Spektra FTIR abu layang dan sampel Gr3 (Handayani, 2019).....	12
Gambar 2.4	Pantulan Sinar-X pada bidang kristal .....	14
Gambar 2.5	Pola CRD Abu Layang, OPC (Ordinary Portland Cement) dan Sampel Geopolimer G100C0, G90C10, G80C20, dan G70C30 (Mehta dan Siddique, 2017) .....	16
Gambar 2.6	Skema dan Cara Kerja dari SEM (mse.iastate.edu) .....	17
Gambar 2.7	Foto SEM geopolimer dari beberapa jenis abu layang (Gunsekara, 2015).....	18
Gambar 2.8	<i>Vicat Apparatus</i> (ASTM C 191-04) .....	24
Gambar 2.9	Pengujian <i>setting time</i> menggunakan instrumen vicat apparatus pada geopolimer .....	24
Gambar 4.1	Kenampakan abu layang dari: (A) PLTU Ketapang (B) PLTU Sanggau Dan (C) PT. Wilmar .....	29
Gambar 4.2	Ukuran partikel abu layang .....	34
Gambar 4.3	Spektra FTIR Abu Layang Kuran Partikel Abu Layang .....	35
Gambar 4.4	Difraktogram Sinar-X Abu Layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau Dan PT. Wilmar ..	37
Gambar 4.5	Mikrograf abu layang PLTU Ketapang .....	40
Gambar 4.6	Mikrograf abu layang PLTU Sanggau.....	40
Gambar 4.7	Mikrograf abu layang PLTU Wilmar .....	40

Gambar 4.8	Proses pencetakan pasta geopolimer dalam cetakan silinder.....	41
Gambar 4.9	Geopolimer: (A). PLTU Sanggau ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 160 gram), (B). PLTU Sanggau ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 40 gram), (C). PT Wilmar ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 160 gram), (D). PLTU Wilmar ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 240 gram), (E). PLTU Ketapang ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 160 gram) Dan (F). PLTU Ketapang ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 240 gram) .....	43
Gambar 4.10	Geopolimer Abu Layang: A). PLTU Ketapang, (B). PLTU Sanggau Dan (C). PT. Wilmar yang Gagal .....	43
Gambar 4.11	Foto geopolimer yang telah diratakan permukaan atas dan bawahnya .....	45
Gambar 4.12	Kuat tekan geopolimer dengan penambahan 32 dan 41% $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar.....	48
Gambar 4.13	Proses geopolimerisasi .....	54
Gambar 4.14	Waktu akhir pengikatan abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar...	55

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1	Pengelompokan kelas abu layang berdasarkan ASTM C 618.....	6
Tabel 2.2	Baku Mutu Beton SNI 03-2847-2002.....	22
Tabel 2.3	Baku Mutu Paving SNI 03-0691-1996.....	23
Tabel 3.1	Komposisi bahan baku dalam pembuatan gopolimer dari Abu Layang PT. Wilmar, PLTU Ketapang dan PLTU Sanggau .....	29
Tabel 4.1	Kenampakan abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar .....	29
Tabel 4.2	Komposisi unsur penyusun abu layang .....	33
Tabel 4.3	Klasifikasi tipe abu layang berdasar data XRF..	34
Tabel 4.4	Sifat fisik abu layang.....	36
Tabel 4.5	Hasil pengamatan sintesis geopolimer .....	47
Tabel 4.6	Kuat Tekan (MPa) Geopolimer Abu Layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar .....	50
Tabel 4.7	Waktu Pengikatan (jam) geopolimer abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar .....	50



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Abu layang (*Fly ash*) merupakan salah satu produk pada pembakaran batu bara yang menjadi perhatian peneliti dalam dua dekade terakhir (Damayanti, 2018). Produksi abu layang semakin berlimpah sejalan dengan diterapkannya Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Tahun 2018 Tentang Pengesahan Rencana Usaha Pengadaan Listrik PT. PLN 2019-2027 untuk pengadaan (*Independent Power Producer/IPP*) dengan target 35.000 MW yang akan berdampak pada peningkatan meningkatnya jumlah PLTU dan konsumsi batu bara. Sebagai hasil dari pembakaran batu bara maka jumlah abu layang yang dihasilkan akan meningkat pula (Damayanti, 2018).

Peraturan Pemerintah No. 101 Tahun 2014 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) menggolongkan abu layang yang memiliki ukuran relatif kecil dan sebagian mengandung logam berat sebagai limbah B3 sehingga produksi abu layang yang semakin banyak harus ditangani dengan baik. Beberapa contoh upaya penanggulangan abu layang yang telah dilaksanakan adalah penggunaan abu layang dalam produksi bahan bangunan, konstruksi jalan, material urukan, aplikasi pertanian dan daur ulang. Sebagian besar pengolahan limbah abu layang terkait dengan bahan dan proyek infrastruktur (Damayanti, 2018).

Semen Portland, yang merupakan bahan utama penunjang infrastruktur, memiliki kelemahan yaitu emisi gas rumah kaca ( $\text{CO}_2$ ) dan ketersediaan bahan baku. Bahan baku semen Portland adalah tanah atau batuan yang mengandung kalsiumsilikat (ASTM C185-15A) dan proses pembuatan semen Portland menghasilkan emisi gas  $\text{CO}_2$  yang tinggi yaitu 945 juta ton  $\text{CO}_2$  per tahun dalam produksi semen di seluruh

dunia (Chindaprasirt dkk., 2007 dan Malhotra, 2002). Oleh karena itu, para peneliti memiliki usulan bahan yang dapat digunakan sebagai pengganti semen Portland yaitu geopolimer. Bakrie dkk. (2011) melaporkan bahwa pasta geopolimer dengan kuat tekan 67,04 MPa dapat diproduksi dari abu layang dengan kandungan kalsium 2,61%, dimana kuat tekan tersebut lebih besar dari baku mutu beton K-500 (Badan Standardisasi Nasional, 2013).

Geopolimer pertama kali dipopulerkan oleh Joseph Davidovits dari Perancis pada tahun 1976 (Davidovits, 1976). Istilah geopolimer digunakan oleh Davidovits karena bahan utama yang digunakan adalah mineral batuan yang mengandung aluminium dan silikat, sehingga disebut geopolimer dimana geopolimer merupakan polimer dari monomer-monomer ion silikat dan aluminat. Polimerisasi terjadi secara polimerisasi kondensasi dan produk yang dihasilkan hanya dapat disebut sebagai geopolimer apabila ion-ion silikat dan aluminat memiliki struktur tetrahedral.

Pada awal pengembangan geopolimer, Davidovits menggunakan kaolin sebagai bahan baku sumber ion silikat dan aluminat, serta *waterglass* dan NaOH sebagai basa pengaktif. Media reaksi adalah air yang jumlahnya harus dibatasi agar campuran berada dalam keadaan gel kental supaya dihasilkan geopolimer yang bersifat amorf. Jika jumlah air terlalu banyak maka akan dihasilkan kristal-kristal zeolit yang dapat mengurangi kekuatan geopolimer yang dihasilkan.

Bahan baku selain kaolin kemudian mulai dikembangkan dalam pembuatan geopolimer. Ji dan Pei (2019) melaporkan pembuatan geopolimer dari *bottom ash* yang menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan 24,1 MPa. Liang dkk. (2019) melaporkan geopolimer dengan kuat tekan 57,0 MPa dengan bahan baku metakaolin sedangkan Nadheem dkk. (2020) melaporkan geopolimer dengan kuat tekan 8,8 MPa dengan bahan baku *natural soil*. Ketiga bahan baku yang digunakan dalam laporan tersebut maupun kaolin yang

digunakan oleh Davidovits adalah bahan-bahan yang memiliki kandungan utama alumino-silikat yang juga dimiliki oleh abu layang.

Sifat fisika dan kimia dari abu layang menjadi faktor penting karena dapat mempengaruhi proses geopolimerisasi (Sari dkk., 2018). Lahoti dkk. (2019) melaporkan bahwa faktor penting yang mempengaruhi proses geopolimerisasi adalah kandungan air, basa pengaktif, jenis kation pada basa pengaktif, morfologi dan kristalinitas. Arslan dkk. (2019) menambahkan bahwa faktor-faktor lain yang juga mempengaruhi proses geopolimerisasi adalah waktu *curing*, suhu *curing*, morfologi dan gugus fungsi Si-O-Al. Sifat fisik dan kimia tersebut dipengaruhi oleh jenis batubara yang digunakan serta proses pembakaran pada *boiler*. Sifat fisika yang dimaksud adalah ukuran partikel dan distribusinya, kristalinitas dan morfologi abu layang sedangkan sifat kimia yang dimaksud meliputi komposisi unsur penyusun, kandungan kalori, tipe abu layang dan gugus fungsi ikatan senyawa. Sifat fisika dan kimia abu layang yang berbeda akan menghasilkan geopolimer yang berbeda pula meskipun diambil dari tempat yang sama (Fansuri dkk., 2008, Faradila, 2019, Pamungkas, 2019, Nugroho, 2019, Sari, 2018).

Salah satu sifat kimia yang berpengaruh pada reaksi geopolimerisasi adalah kandungan kalsium. Nugroho (2019) menjelaskan bahwa abu layang yang memiliki kandungan tinggi kalsium menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan awal yang cukup tinggi dan stabil. Selain itu abu layang tinggi kalsium menghasilkan geopolimer dengan *setting time* (waktu pengikatan) yang lebih cepat dari waktu pengikatan beton semen Portland (120-150 menit). Namun, waktu pengikatan yang terlalu pendek juga tidak dikehendaki karena geopolimer terlalu cepat mengeras sebelum dapat dicetak. Sebaliknya abu layang yang memiliki kandungan kalsium terlalu rendah justru membuat abu layang gagal membentuk matriks geopolimer (Faradila, 2019 dan Pamungkas, 2019). Oleh karena itu, perlu

dilakukan upaya untuk mengontrol geopolimerisasi abu layang yang memiliki kandungan kalsium yang tinggi. Pada penelitian ini digunakan abu layang rendah kalsium yang diambil dari PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar yang kemudian divariasi komposisinya. Variasi yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan geopolimer dari abu layang rendah kalsium yang memiliki *setting time* yang tidak terlalu cepat dengan kuat tekan optimum.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Pembentukan dan kualitas geopolimer sangat bergantung pada sifat fisika dan sifat kimia abu layang. Salah satu faktor penting tersebut adalah kandungan kalsium. Abu layang tinggi kalsium menghasilkan *setting time* terlalu cepat sehingga menyebabkan masalah ketika dicetak, sedangkan abu layang rendah kalsium mengalami gagal sintesis di beberapa sampel abu layang. Haryanti (2014) melaporkan bahwa abu layang diklasifikasikan rendah kalsium jika mengandung CaO kurang dari 10%. Faradila (2019 dan Pamungkas (2019) juga melaporkan bahwa abu layang rendah kalsium tidak dapat membentuk geopolimer karena jumlah natrium silikat yang ditambahkan tidak cukup banyak untuk membentuk oligomer yang nantinya akan menjadi oligomer aluminosilikat sebagai inisiator terjadinya reaksi geopolimerisasi. Oleh karena itu perlu dilakukan pengamatan terkait penambahan natrium silikat dengan *setting time* pada pembuatan geopolimer dengan bahan baku abu layang berkadar kalsium rendah.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan produk geopolimer dari abu layang rendah kalsium dengan kuat tekan yang masuk dalam baku mutu beberapa produk bangunan.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa interval variasi komposisi dari penambahan

*waterglass* untuk mendapatkan kuat tekan optimal. Sehingga abu layang rendah kalsium dapat dimanfaatkan pada aplikasi bangunan atau infrastruktur.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Abu Layang**

Abu layang atau *fly ash* merupakan hasil samping dari proses pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (Arini dkk., 2013 dan Manuahe dkk., 2014). Istilah “Abu layang” biasanya digambarkan sebagai setiap material partikulat halus presipitasi dari tumpukan gas hasil pembakaran bahan bakar pada tungku industri. Jumlah abu layang yang dapat diperoleh dari tungku industri bervariasi mulai dari satu ton tiap hari sampai beberapa ton tiap menit. Karakteristik dari abu layang berbeda-beda tergantung dari asal, sifat dan ukuran pembakaran bahan bakarnya (batu bara). Senyawa kimia yang terdapat pada abu layang adalah senyawa aluminosilikat ( $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), hal ini yang membuatnya menjadi bahan utama pembuatan semen pengganti semen portland (Xu dan Van Deventer, 2000). Penelitian yang berkembang saat ini adalah pemanfaatan abu layang sebagai material geopolimer karenapotensi aluminosilikat yang besar (Xu dan Van Deventer, 2000).

Namun, geopolimer berbasis abu layang masih sulit untuk diaplikasikan dalam skala besar. Salah satu penyebab utamanya adalah beragamnya komposisi abu layang yang berbeda-beda dari satu sumber dengan sumber lainnya, bahkan dari sumber yang sama pun komposisinya bisa berbeda. Abu layang dari batu bara memiliki karakteristik (distribusi ukuran partikel, kandungan fasa gelas, silikon reaktif, dan aluminium, keberadaan besi, kalsium, dan partikel-partikel inert) yang berbeda-beda bergantung pada bahan dari batu bara yang digunakan dan proses pembakarannya. Karakteristik abu layang berpengaruh pada proses geopolimerisasi sehingga belum ada *mix design* yang pasti pada pembuatan geopolimer (Fansuri dkk., 2008, Shi dkk., 2011, Khale dkk., 2007,

Komljenovic dkk., Torgal dkk., 2008, 2015, Duxon dkk., 2007).

Abu layang dikelompokkan ke dalam tiga kelas yaitu kelas N, kelas F, dan kelas C berdasarkan kandungan  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Tabel klasifikasi abu layang ditampilkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Pengelompokan kelas abu layang berdasarkan ASTM C 618

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

Sumber : Wardani (2008)

## 2.2 Basa Pengaktif

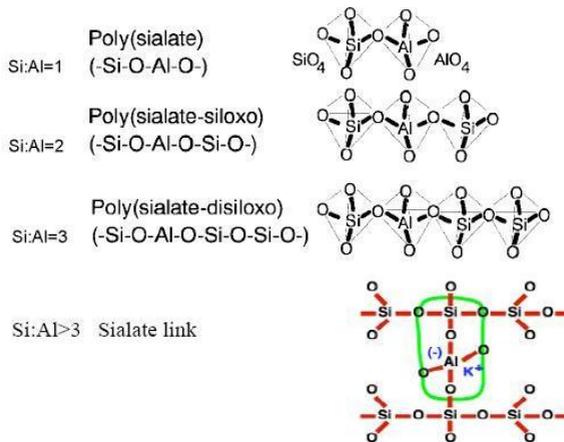
Pada pembuatan geopolimer diperlukan aktivator untuk memperlancar jalannya reaksi, karena saat pembuatan geopolimer terjadi reaksi polimerisasi secara kondensasi. Senyawa aktivator yang secara umum digunakan ialah senyawa NaOH dan KOH. Jika NaOH digunakan sebagai aktivator maka dihasilkan geopolimer dengan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan aktivator KOH. Pada pembuatan geopolimer aktivator yang berupa padatan dilarutkan kedalam air yang disesuaikan dengan molaritas larutan aktivator yang diinginkan (Adiputro, 2013). Konsentrasi aktivator sangat berpengaruh pada kekuatan mekanik geopolimer. Karena sifat dan konsentrasi alkali aktivator memiliki pengaruh yang dominan pada struktur dan sifat geopolimer (Komljenovic dkk, 2010). Semakin tinggi konsentrasi aktivator, semakin besar pula kekuatan dari geopolimer. Hal tersebut dikarenakan

apabila konsentrasi tinggi, jumlah mol yang dapat membentuk ikatan polimer juga semakin banyak (Adiputro, 2013).

### 2.3 Geopolimer

Geopolimer merupakan material yang disintesis dengan cara polimerisasi dari bahan-bahan anorganik. Biasanya bahan yang banyak mengandung silika (Si) dan Alumina (Al) yang berasal dari limbah industri seperti abu layang, abu padi dan lain-lainnya (Davidovits, 1997). Proses pembuatan material geopolimer tidak membutuhkan energi yang tinggi sehingga dapat meminimalisir emisi gas rumah kaca dan ramah lingkungan karena pada reaksi pepadatan geopolimer tidak membebaskan banyak gas CO<sub>2</sub> (Wiyono dkk., 2012). Pada Gambar 2.1, struktur dari geopolimer dapat dikategorikan menjadi 3 bentuk dasar geopolimer tergantung dari rasio Si/Al, yaitu *poly(sialate)*, *poly(sialate-siloxo)*, dan *poly(sialate-disiloxo)*. Sifat geopolimer dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain : suhu, waktu, dan kelembaban relatif. Ketika suhu reaksi meningkat akan mempercepat pepadatan dan meningkatkan kuat tekan dari geopolimer (Palomo dkk., 2004)

Proses pembuatan material geopolimer tidak membutuhkan energi yang tinggi sehingga dapat meminimalisir emisi gas rumah kaca dan ramah lingkungan karena pada reaksi pepadatan geopolimer tidak membebaskan banyak gas CO<sub>2</sub> (Wiyono dkk., 2012). Pada Gambar 2.1, struktur dari geopolimer dapat dikategorikan menjadi 3 bentuk dasar geopolimer tergantung dari rasio Si/Al, yaitu *poly(sialate)*, *poly(sialate-siloxo)*, dan *poly(sialate-disiloxo)*



Gambar 2.1 Kategori Struktur Geopolimer (Davidovits, 1994)

Beton geopolimer merupakan beton geosintetik yang tidak menggunakan semen sebagai bahan dasar, tetapi menggunakan bahan *pozzolan* berupa abu layang yang banyak mengandung unsur Al dan Si dimana unsur-unsur ini sangat memegang peranan penting dalam mempengaruhi karakteristik geopolimer. Dalam pembuatan geopolimer dibutuhkan larutan alkali yang berfungsi sebagai pengaktif reaksi polimerisasi dari Si dan Al yang terkandung dalam abu layang. Larutan alkali yang umum digunakan adalah natrium hidroksida (NaOH) atau kalium hidroksida (KOH) dengan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) atau kalium silikat (Lloyd dan Rangan, 2010).

Proses polimerisasi yang terjadi di dalam beton geopolimer meliputi reaksi kimia yang terjadi antara alkalin dengan mineral Si-Al sehingga menghasilkan rantai polimerik tiga dimensi dan ikatan struktur Si-O-Al-O yang konsisten (Davidovits, 1991).

## 2.4 *X-Ray Fluorescence (XRF)*

*X-Rays Fluorescence (XRF)* adalah salah satu metode yang digunakan untuk analisis 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.

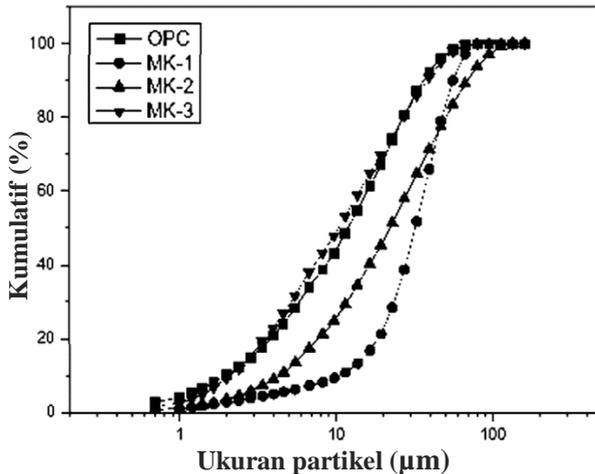
Pada analisis kuantitatif faktor-faktor yang berpengaruh dalam analisis antara lain adalah matriks bahan, kondisi kevakuman dan konsentrasi unsur dalam bahan, pengaruh unsur yang memiliki energi karakteristik unsur yang dianalisis (Kriswarini dkk., 2010). Analisis XRF dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan karakteristik sinar-X yang terjadi akibat efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi karena elektron dalam atom target pada sampel terkena sinar berenergi tinggi (Beckhoff dkk., 2007). Analisa ini digunakan untuk menentukan komposisi dari abu layang sehingga dapat diprediksi kemungkinan terbentuknya matriks geopolimer.

## 2.5 *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*. Digunakan metode LAS karena metode ini dinilai lebih akurat bila dibandingkan dengan metode analisis gambar maupun metode ayakan (*sieve analysis*), terutama untuk sampel-sampel dalam ukuran nanometer maupun submikron. Metode ini menjadi prinsip dasar dalam instrumen *Particle Size Analyzer (PSA)*. Prinsip dari *laser*

*diffraction* 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). Hasil analisa PSA berupa grafik distribusi ukuran partikel yang selanjutnya digunakan untuk melihat ukuran partikel. Gambar 2.2 merupakan grafik distribusi partikel dari metakaolin dan abu sekam padi. Semakin kecil ukuran partikel, semakin besar pula kemungkinan terbentuknya matriks geopolimer karena dipengaruhi luas penampang abu layang. Dalam jumlah yang sama, abu layang yang ukuran partikelnya lebih kecil akan mempercepat laju geopolimerisasi.

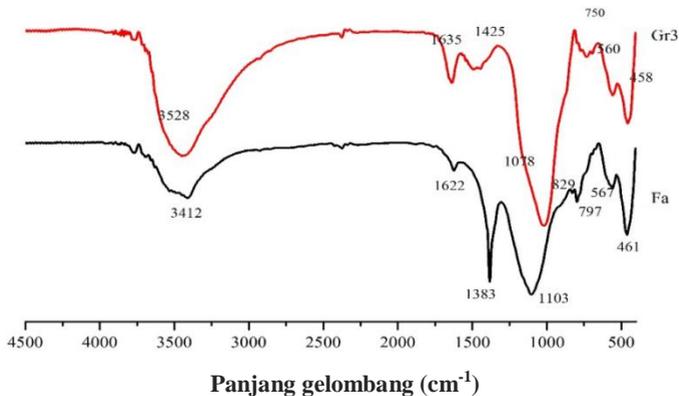


Gambar 2.2 Distribusi ukuran partikel metakaolin dan semen Portland (Siddique dan Khan, 2011)

## 2.6 *Fourier Transform Infra Red (FTIR)*

*Fourier Transform Infra Red* merupakan suatu metode karakterisasi yang digunakan untuk mengidentifikasi senyawa dengan melihat dari spektra gugus fungsi yang ada. Sampelnya dapat berbentuk gas, padat ataupun cair. Prinsip yang ada pada instrument ini berdasar pada vibrasi internal gugus fungsi yang ada pada senyawa sampel. Sampel yang sudah diletakkan dalam *sample holder* akan terkena berkas infra merah kemudian diadsorpsi sesuai dengan frekuensi vibrasi molekular dan diteruskan ke frekuensi yang lain (Sibilia, 1996). Frekuensi yang didapat dikonversi menjadi energi kemudian ditangkap oleh detektor dan digambarkan pada spektra infra merah untuk dianalisis puncak-puncak yang dihasilkan oleh sampel. Karena setiap sampel memiliki struktur yang berbeda, tentunya nanti akan didapatkan spektra yang spesifik tiap senyawa. Hal ini merupakan salah satu alasan FTIR dapat dijadikan sebagai analisis kuantitatif (Sastrohamidjojo, 1992). Gambar 2.3

merupakan spektra FTIR dari abu layang dan sampel Gr3. Puncak 3412 dan 1622  $\text{cm}^{-1}$  merupakan vibrasi dari H-O-H. Puncak 1383  $\text{cm}^{-1}$  merupakan vibrasi deformasi C-O, di sampel Gr3 pada puncak 1425  $\text{cm}^{-1}$ . Gugus fungsi C-O ini merupakan hasil  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dimana terbentuk dari karbonasi geopolimer yang kaya NaOH. Puncak 1103  $\text{cm}^{-1}$  adalah puncak *stretch* Si-O tetrahedral. Puncak di 750 dan 458  $\text{cm}^{-1}$  merupakan representasi dari vibrasi gugus fungsi dari Si-O-Si/ Si-O-Al dan Al-O/ Si-O.



Gambar 2.3 spektra FTIR abu layang dan sampel Gr3 (Haryanti, 2019)

## 2.7 Bomb Kalorimeter

Panas yang timbul atau diserap pada suatu reaksi panas itu tidak bergantung pada hasil akan tetapi bagaimana reaksi tersebut berlangsung dari awal sampai akhir. Berdasarkan hukum Hess tersebut maka dapat dicari panas reaksi bagi suatu reaksi-reaksi yang sukar dilakukan. Panas pembentukan adalah panas reaksi pada pembentukan satu mol suatu zat dari unsur-unsurnya, jika aktivitas pereaksinya satu, hal ini disebut dengan panas pembentukan standar. Untuk zat cair, gas dan padat

keadaan standarnya adalah keadaan pada satu atmosfer. Panas pembakaran adalah panas yang timbul pada pembakaran satu mol suatu zat, biasanya panas pembakaran ditentukan secara eksperimen pada volume tetap dalam bom kalorimeter. Dari panas pembakaran, dapat diperoleh panas pembentukan senyawa-senyawa organik. Panas pembakaran mempunyai arti penting pada bahan-bahan bakar sebab nilai suatu bahan bakar ditentukan oleh besarnya panas pembakaran zat yang bersangkutan (Sugiyarto, 1996).

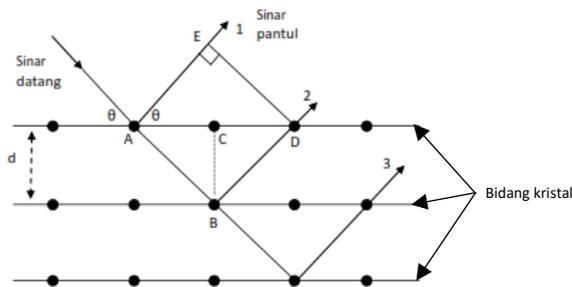
Kalorimetri yang lebih teliti adalah yang lebih terisolasi serta memperhitungkan kalor yang diserap oleh perangkat kalorimeter (wadah, pengaduk, termometer). Jumlah kalor yang diserap atau dibebaskan kalorimeter dapat ditentukan jika kapasitas kalor dari kalorimeter diketahui. Dalam hal ini jumlah kalor yang dibebaskan atau diserap oleh reaksi sama dengan jumlah kalor yang diserap atau dibebaskan oleh kalorimeter ditambah dengan jumlah kalor yang diserap atau dibebaskan oleh larutan di dalam kalorimeter. Oleh karena energi tidak dapat dimusnahkan atau diciptakan, maka kesetimbangan kalor dapat dituliskan sesuai dengan persamaan 2.1 (Syukri, 1999).

$$Q_{\text{reaksi}} = (-Q_{\text{kalorimeter}} - Q_{\text{larutan}}) \quad (2.1)$$

## 2.8 *X-Ray Diffraction (XRD)*

Metode difraktometer sinar-X (*XRD = X-ray Diffraction*) adalah metode analisis kandungan mineral berdasarkan struktur kristalin. Sinar-X ditemukan pertama kali oleh Wilhelm Conrad Rontgen pada tahun 1895. Karena asalnya tidak diketahui waktu itu maka disebut sinar-X. Disamping itu, sinar-X dapat juga digunakan untuk menghasilkan pola difraksi tertentu yang dapat digunakan dalam analisis kualitatif dan kuantitatif material. Gambar 2.4

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



Gambar 2.4 Pantulan sinar-X pada bidang kristal

Dasar dari penggunaan difraksi sinar-X untuk mempelajari kisi kristal adalah berdasarkan persamaan Bragg (persamaan 2.2):

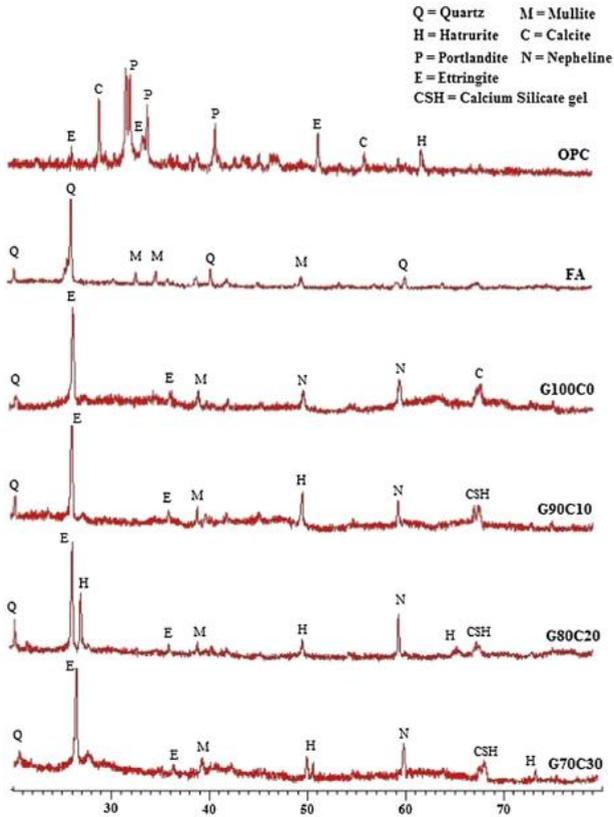
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta ; n = 1, 2, \dots \quad (2.2)$$

dimana,  $n$  = urutan difraksi;  $\lambda$  = panjang gelombang sinar-X;  $d$  = jarak antar bidang kristal; dan  $\theta$  = sudut difraksi.

Berdasarkan persamaan Bragg, jika seberkas sinar-X dijatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal itu akan memantulkan sinar-X yang memiliki panjang gelombang sama

dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar yang dipantulkan akan ditangkap oleh detektor kemudian diterjemahkan sebagai sebuah puncak difraksi. Makin banyak bidang kristal yang terdapat dalam sampel, makin kuat intensitas pemantulan yang dihasilkannya. Tiap puncak yang muncul pada pola XRD mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. Gambar 2.5 merupakan pola XRD dari abu layang, semen Portland dan sampel geopolimer (Mehta dan Siddique, 2017).

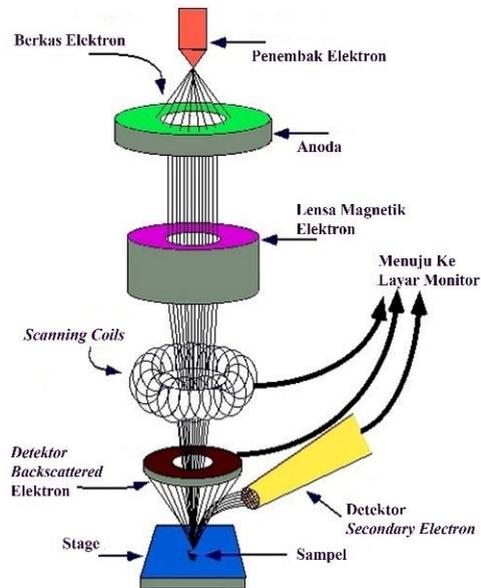
XRD dapat digunakan untuk menentukan komposisi dari mineral dan kristalinitas pada sampel abu layang dan geopolimer. Geopolimer dapat bereaksi dengan abu layang yang bersifat amorf. Tanda bahwa abu layang tersebut bersifat amorf yaitu adanya gundukan (*hump*) pada  $2\theta = 20-40^\circ$ . Sedangkan untuk geopolimer ditandai dengan gundukan dan puncak kristalin *quartz*, *mullite* dan *calcite*. Sehingga pada penelitian tersebut dapat dihasilkan geopolimer sesuai standar mutu sesuai dengan prediksi pola XRD abu layang.



Gambar 2.5 Pola XRD Abu Layang, (*Ordinary Portland Cement*) OPC dan Sampel Geopolimer G100C0, G90C10, G80C20 dan G70C30 (Mehta dan Siddique, 2017)

## 2.9 Scanning Electron Microscope (SEM)

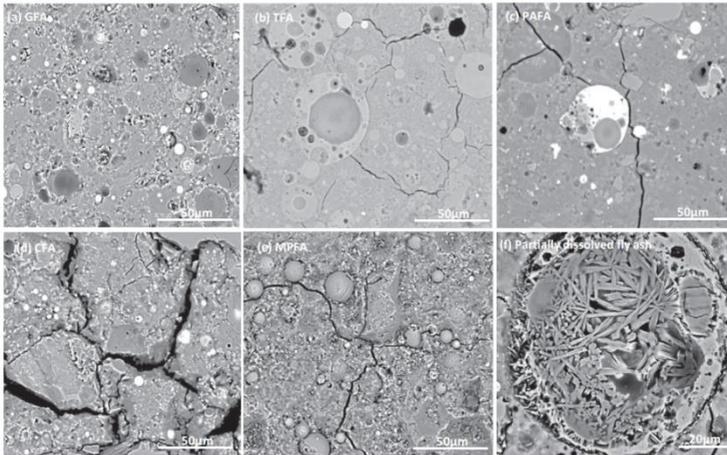
*Scanning Electron Microscope* (SEM) merupakan suatu jenis mikroskop yang dapat melihat permukaan suatu sampel dalam skala nano-picometer. Gambar 2.6 merupakan skema dan mekanisme kerja dari SEM.



Gambar 2.6 Skema dan Cara Kerja dari SEM (mse.iastate.edu)

Langkah kerja dari SEM adalah dengan menembakkan sinar elektron melalui sebuah pistol elektron kemudian sinar elektron tersebut dipercepat dengan anoda. Selanjutnya lensa magnetik memfokuskan elektron menuju ke sampel. Sinar elektron yang terfokus memindai (*scan*) keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai. Ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor. SEM hanya memanfaatkan SE dan BSE untuk memperoleh informasi struktur mikro, sedangkan sinar-X digunakan untuk menganalisa komposisi kimia pada permukaan sampel. Sampel yang akan dikarakterisasi dengan SEM, harus mempunyai

permukaan yang relatif rata dan halus (Johan, 2009). Gambar 2.7 merupakan mikrograf dari geopolimer pada penelitian yang dilakukan Gunsekara pada tahun 2015. Tampak bahwa geopolimer yang baik adalah yang memiliki permukaan yang halus, lubang yang terlihat pada Gambar 2.5 memungkinkan adanya keretakan ketika diuji kuat tekan.



Gambar 2.7 Foto SEM geopolimer dari beberapa jenis abu layang (Gunsekara, 2015)

## 2.10 Kuat Tekan

Beton akan memiliki sifat yang baik jika memiliki kuat tekan yang tinggi (antara 20 – 50 MPa, pada umur 28 hari). Mutu beton dapat direpresentasikan dengan meninjau dari kuat tekannya saja (Tjokrodimuljo, 1996). Faktor-faktor mempengaruhi kekuatan beton, yaitu :

i). Faktor air semen (FAS) dan kepadatan

Fungsi dari faktor air semen adalah untuk memungkinkan reaksi kimia yang menyebabkan pengikatan dan berlangsungnya pengerasan, sebagai pelicin campuran

kerikil, pasir dan semen agar lebih mudah dalam pencetakan beton. Kekuatan tekan beton ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat kasar dan halus, air dan berbagai jenis campuran. Perbandingan dari air terhadap semen merupakan faktor utama didalam penentuan kekuatan beton (Chu, 1986). Sehingga dapat disimpulkan bahwa hampir untuk semua tujuan, beton yang mempunyai faktor air semen minimal dan cukup untuk memberikan workabilitas tertentu yang dibutuhkan untuk pemadatan, merupakan beton yang terbaik (Murdock dan Rooks, 1979).

ii). Umur beton

Kuat tekan beton akan bertambah sesuai dengan bertambahnya umur beton tersebut. Karena laju polimerisasi pada beton akan berlangsung secara optimal.

iii). Jenis dan jumlah semen

Jenis semen berpengaruh terhadap kuat tekan beton, sesuai dengan tujuan penggunaannya. Perbandingan ini sesuai dengan kebutuhan dan kondisi lingkungan yang ada.

iv). Sifat agregat

Sifat agregat yang paling berpengaruh terhadap kekuatan beton adalah kekasaran permukaan dan ukuran maksimumnya. Pada agregat dengan permukaan kasar akan terjadi ikatan yang baik antara pasta semen dengan agregat tersebut. Pada agregat berukuran besar luas permukaannya menjadi lebih sempit sehingga lekatan dengan pasta semen menjadi berkurang (Tjokrodinuljo, 1996). Uji kuat tekan merupakan penujian untuk menentukan banyaknya beban persatuan luas dan menyebabkan benda tersebut hancur. Besarnya nilai kuat tekan pada benda uji dapat dihitung dengan persamaan 2.3 sebagai berikut :

$$P = F/A \quad (2.3)$$

dimana P = kuat tekan (MPa atau N/m<sup>2</sup>), F=gaya tekan (N), A= luas penampang benda uji (m<sup>2</sup>)

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).

Tata cara pengujian yang umumnya dipakai adalah standar ASTM C39-86. Kuat tekan masing-masing benda uji ditentukan oleh tegangan tekan tinggi (P) yang dicapai benda uji umur 28 hari akibat beban tekan selama percobaan (Dipohusodo, 1996). Standar kuat tekan sendiri berbeda-beda bergantung pada aplikasi beton yang nantinya digunakan. Untuk aplikasi beton, baku mutu disajikan dalam Tabel 2.2. sedangkan untuk aplikasi paving disajikan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2. 2 Baku Mutu Beton SNI 03-2847-2002

Mutu Beton	Kuat Tekan (Mpa)
K – 225	18
K – 250	20
K – 275	22
K – 300	24
K – 350	28
K – 400	32
K – 450	36
K – 500	40

Sumber : Badan Standardisasi Nasional (1996)

Tabel 2. 3 Baku Mutu Paving SNI 03-0691-1996

Mutu Paving	Kuat Tekan (MPa)	
	Rata-rata	Minimal
A	40	35
B	20	17
C	15	12,5
D	10	8,5

Sumber : Badan Standardisasi Nasional (1996)

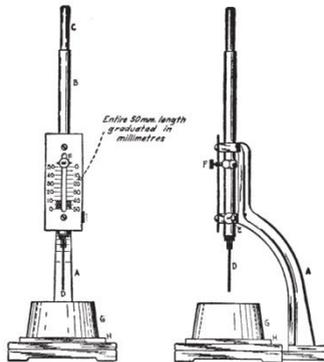
### 2.11 *Setting-time Geopolymer*

*Setting time* atau waktu pengikatan adalah waktu yang dibutuhkan geopolimer untuk menyusun matriks geopolimer. Waktu pengikatan sering disebut sebagai waktu hidrasi dimana ion dikelilingi oleh molekul-molekul air yang tersusun dalam keadaan tertentu. Hidrasi membantu menstabilkan ion-ion dalam larutan dan mencegah kation untuk bergabung kembali dengan anion (Chang, 2003).

Pengujian *setting time* mengacu pada ASTM C 191-04. Gambar dari alat uji vicat apparatus ditampilkan pada Gambar 2.8. *Setting time* berpengaruh besar pada aplikasi geopolimer karena selama ini geopolimer yang memiliki kuat tekan yang cukup tinggi memiliki *setting time* yang cepat pula, sehingga perlu adanya penyesuaian terkait lama *curing* dari beton itu sendiri. Baku mutu untuk waktu pengikatan beton adalah 120 sampai 150 menit. (Badan Standardisasi Nasional, 2002).

Data yang dihasilkan berupa kedalaman jarum vicat yang diukur sejak pasta geopolimer dituang sampai mengeras dan jarum tidak dapat menancap lagi. Waktu pengikatan sampel dikatakan selesai jika jarum vicat tidak dapat masuk pada sampel pada waktu tertentu. Data yang diperoleh diplot

waktu dan kedalaman jarum vicat, sehingga dapat dilihat waktu yang dibutuhkan oleh pasta geopolimer untuk mengeras. Gambar 2.9 merupakan cara pengujian *setting time* pada sampel geopolimer.



Gambar 2.8 Vicat Apparatus (ASTM C 191-04)



Gambar 2.9 Pengujian *setting time* menggunakan instrumen Vicat Apparatus pada geopolimer

## **BAB III METODOLOGI**

### **3.1 Alat dan Bahan**

#### **3.1.1 Alat**

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini meliputi peralatan pembuatan geopolimer dari abu layang dan serta instrumen karakterisasi. Pembuatan geopolimer dari abu layang dilakukan dengan menggunakan mixer listrik, gelas plastik, loyang aluminium, aluminium foil, ayakan 100 mesh, gelas beaker, neraca analitik, sendok plastik, plastik *wrap*, plastik *clip*, toples plastik, *stirrer*, corong plastik, labu ukur 50 mL, gelas beaker 100 mL, gelas beaker 250 mL dan neraca analitik.

Instrumen yang digunakan untuk karakterisasi abu layang dan geopolimer meliputi *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang ada di Laboratorium Pusat Pembelajaran PT Semen Indonesia - Gresik, *Particle Size Analyzer* (PSA) merk Malvern Mastersizer 2000 di laboratorium PT. Semen Indonesia - Gresik, X-Ray Diffraction (XRD) merk Xpert PANalytical di laboratorium instrument Teknik Material ITS, *Fourier Transmittance Infra Red* (FTIR) merk Shimadzu Spectrum One 8400S di laboratorium instrument Departemen Kimia ITS, Bomb Kalorimeter merk IKA C200 laboratorium fundamental Departemen Kimia ITS, *Scanning Electron Microscopy* (SEM) di Laboratorium Energi dan Lingkungan - ITS, mesin penguji kuat tekan (*universal testing machine*) di laboratorium beton Departemen Teknik Infrastruktur Sipil ITS.

#### **3.1.2 Bahan**

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu layang rendah kalsium PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar, aluminium hidroksida ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ),

natrium hidroksida (NaOH) p.a., HCl 37%, natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) teknis (*water glass*) dari Merck, dan air terdemineralisasi (aqua DM).

## **3.2 Prosedur kerja**

### **3.2.1 Karakterisasi Abu Layang**

#### **3.2.1.1 Penentuan Komposisi Abu Layang**

Abu layang yang diambil dari tiga yang berbeda diambil kemudian dianalisis menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF). Abu layang tersebut berasal dari PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar. Analisis tersebut dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur yang terdapat didalam abu layang. Analisis XRF juga bertujuan untuk melakukan verifikasi bahwa abu layang yang digunakan adalah abu layang yang rendah kalsium. Haryanti (2014) menjelaskan bahwa klasifikasi abu layang dikatakan rendah kalsium jika mengandung CaO kurang dari 10%. Analisa XRF dilakukan di laboratorium Pusat Pembelajaran PT Semen Indonesia yang berada di Gresik.

#### **3.2.1.2 Penentuan Ukuran Partikel Abu Layang**

Analisis *Particle Size Analyzer* (PSA) pada abu layang bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel dari abu layang yang akan disintesis. Analisis ini dilakukan di Laboratorium Pusat Pembelajaran PT Semen Indonesia yang berada di Gresik.

#### **3.2.1.3 Penentuan Gugus Fungsi Partikel Abu Layang**

Abu layang diuji dengan instrumen *Fourier Transmittance Infra Red (FTIR)* merk Shimadzu Spectrum One 8400S. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat dalam abu layang. Analisa ini dilakukan dengan cara menambah abu layang dengan KBr lalu digerus. Bubuk yang sudah digerus kemudian dibentuk menjadi pelet menggunakan press hidorolik kemudian diuji pada bilangan

gelombang 400-4000  $\text{cm}^{-1}$ . Analisis ini dilakukan di Laboratorium instrument Departemen Kimia ITS.

#### **3.2.1.4 Penentuan Kandungan Kalori pada Abu Layang**

Abu layang juga diuji dengan Bomb Kalorimeter IKA C200. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui jumlah kalor campuran yang ada pada abu layang. 1,1 gram abu layang yang akan dianalisis dimasukkan dalam *crucible*. Setelah itu *crucible* dimasukkan kedalam baja bom dan diberikan tekanan sebesar 30 atm. Setelah itu dilakukan pengujian, hasil analisisnya dapat dilihat di monitor. Analisis ini dilakukan di Laboratorium Fundamental Departemen Kimia ITS

#### **3.2.1.5 Penentuan Fasa dan Mineral Abu Layang**

Penentuan Fasa dan Mineral Abu Layang dengan X-Ray Diffraction (XRD) merk Xpert PANalytical yang terdapat di laboratorium Teknik Material dan Metalurgi ITS. Kondisi operasi dari instrument XRD yakni menggunakan sumber sinar  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), tegangan dan arusnya sebesar 40kV dan 30 mA. Pengukuran dilakukan pada  $2\theta$  mulai dari  $5^\circ$ -  $95^\circ$  dengan kecepatan 20 permenit dengan *step size*  $0,02^\circ$ . Analisa ini dilakukan di Laboratorium Instrumen Departemen Teknik Material ITS.

#### **3.2.1.6 Penentuan Morfologi Abu Layang**

Abu layang dari PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar diuji dengan *scanning electron microscopy* (SEM) yang ada di Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS. Analisis SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi dari abu layang. Gambar yang didapatkan dibandingkan dengan data lain melihat morfologi serta distribusi partikelnya.

### **3.2.2 Pembuatan Geopolimer**

Geopolimer dibuat dengan metode seperti yang telah dilaporkan oleh Faradila (2019). Tahap pembuatan geopolimer

meliputi penyiapan fasa padatan, pembuatan basa pengaktif dan pencampuran keduanya untuk membentuk geopolimer.

### 3.2.2.1 Preparasi Fasa Padatan

Fasa padatan disiapkan untuk mengatur rasio Si/Al dengan menambahkan unsur alumunium ke abu layang karena kandungan alumunium pada abu layang yang digunakan lebih rendah daripada yang diinginkan. Fasa padatan disiapkan dengan standardisasi  $\text{Al}(\text{OH})_3$  sebagai sumber alumunium. Metode penambahan alumunium mengacu laporan Faradila (2019).

Mula-mula abu layang diayak menggunakan ayakan 100 mesh. Selanjutnya abu layang tersebut dikeringkan dalam oven pada suhu  $105\text{ }^\circ\text{C}$  selama 24 jam. Setelah dingin, 260 gram abu layang yang telah dikeringkan ditambahi 3,4 gram serbuk  $\text{Al}(\text{OH})_3$  yang dilarutkan dalam 800 mL air dan dicampur sampai homogen. Selanjutnya diaduk dengan *mixer* sampai homogen. Setelah itu dikeringkan di dalam oven selama 24 jam dengan suhu  $105\text{ }^\circ\text{C}$ . Setelah kering campuran digerus menjadi serbuk halus.

### 3.2.2.2 Pembuatan Basa Pengaktif

Larutan basa pengaktif dibuat dengan cara mencampurkan larutan  $\text{NaOH}$  14 M dan larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (*waterglass*). Larutan  $\text{NaOH}$  dibuat dengan melarutkan 28,0 gram padatan  $\text{NaOH}$  ke dalam air terdemineralisasi (aqua DM) hingga volume totalnya menjadi 50 mL. Larutan  $\text{NaOH}$  kemudian didiamkan selama 24 jam. Selanjutnya, larutan  $\text{NaOH}$  ditambahkan ke dalam  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan komposisi tertentu dan diaduk hingga homogen. Selanjutnya ditutup dengan plastik *wrap* dan didiamkan selama 6 jam.

### 3.2.2.3 Sintesis Geopolimer

Fasa padat yang dihasilkan dari prosedur sub Bab 3.2.2.1 dimasukkan ke dalam wadah mixer. Larutan basa pengaktif ditambahkan ke dalam wadah dan pada saat yang sama mixer

dihidupkan. Pencampuran dengan *mixer* dilakukan selama 4 menit. Pasta geopolimer berbentuk gel yang terbentuk kemudian dimasukkan ke dalam cetakan berbentuk silinder dengan rasio diameter berbanding tinggi 1:2. Pasta gel didiamkan di dalam cetakan sampai mengeras dan dapat dilepasakan dari cetakannya. Gel geopolimer yang telah mengeras selanjutnya dimasukkan dalam kantong plastik klip dan dipanaskan di dalam oven selama 24 jam pada suhu 55 °C. Komposisi abu layang,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  untuk geopolimer dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Komposisi bahan baku dalam pembuatan gopolimer dari Abu Layang PT. Wilmar, PLTU Ketapang dan PLTU Sanggau

Abu Layang	Abu Layang (gram)	$\text{Al}(\text{OH})_3$ (gram)	$\text{NaOH}$ (gram)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (gram)	Massa Total (gram)	Kadar $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (m/m) (%)
PLTU Ketapang	260	3,4	78	80	421,4	19
				160	501,4	32
				240	581,4	41
PLTU Sanggau	260	3,4	78	80	421,4	19
				160	501,4	32
				240	581,4	41
PT. Wilmar	260	3,4	78	80	421,4	19
				160	501,4	32
				240	581,4	41

### 3.2.3 Karakterisasi Geopolimer

#### 3.2.3.1 Uji Kuat Tekan

Sampel geopolimer yang dibuat dan sudah mencapai hari ke-7 diuji kuat tekannya menggunakan mesin pengujian kuat tekan (*universal testing machine*) di laboratorium beton Departemen Teknik Infrastruktur Sipil ITS. Pengujian dilakukan dengan menggunakan 5 sampel pengulangan agar didapatkan rata-rata dan deviasi kuat tekannya. Data yang diperoleh merupakan gaya tekan yang diberikan kepada

geopolimer dalam satuan kilo Newton (kN). Hasil analisis dikonversi dan disajikan dalam satuan Mega Pascal (MPa).

### **3.2.3.2 Uji *Setting time***

Pasta geopolimer yang telah dituang ke dalam cetakan dapat mengeras kurang ataupun lebih dari 24 jam bergantung pada jenis abu layang. Menurut Nath (2017), *setting time* dari abu layang rendah kalsium tanpa penambahan binder *apapun* membutuhkan waktu yang lebih lama. Pengujian *setting time* dilakukan untuk mengetahui rentang waktu dimana geopolimer mengeras sepenuhnya. Pengujian *setting time* ini menggunakan jarum vikat. Pada interval 20 jam dilakukan pengujian dengan menancapkan jarum vikat pada sampel geopolimer yang masih ada pada cetakan. Hasil pengukuran berupa panjang jarum vikat yang tertancap masuk pada geopolimer.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

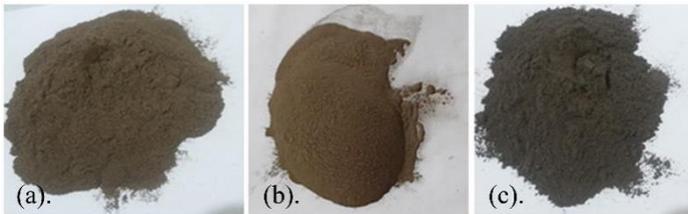
### 4.1 Karakteristik Abu Layang

#### 4.1.1 Hasil Penampakan Abu Layang

Kenampakan abu layang merupakan hasil dari analisis visual yang sudah dilakukan. Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 merupakan penampakan abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar.

Tabel 4.1 Kenampakan abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar

No.	Abu Layang	Warna	Tekstur
1	PLTU Ketapang	Coklat tua	Halus seperti debu
2	PLTU Sanggau	Coklat tua dan bintik putih	Halus seperti debu
3	PT. Wilmar	Hitam	Halus seperti debu



Gambar 4.1 Kenampakan abu layang dari: (a) PLTU Ketapang (b) PLTU Sanggau dan (c) PT. Wilmar

Ketiga abu layang yang disintesis memiliki warna dan tekstur yang berbeda karena perbedaan proses pembakaran batu bara. Tekstur yang sama antara satu sama lain dipengaruhi

oleh ukuran partikel yakni mencapai 99,8% dibawah 150  $\mu\text{m}$ . Warna abu layang ini akan sama dengan warna akhir dari geopolimer (Faradila, 2019).

#### **4.1.2 Komposisi Abu Layang**

Analisis komposisi abu layang dilakukan dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Umumnya abu layang mengandung unsur-unsur Si, Al, Fe sebagai penyusun utama dan unsur-unsur Na, Mg, Ca, S, C dan lainnya dengan jumlah yang bervariasi dan sering ditemukan dalam bentuk oksidanya. Tabel 4.2 merupakan data hasil analisis XRF yang kemudian digunakan untuk mengklasifikasikan jenis abu layang. Berdasarkan data pada Tabel 4.2 diketahui bahwa kandungan kalsium abu layang dari PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar kurang dari 10% yang menurut Haryanti (2014) masuk dalam kelompok abu layang berkadar kalsium rendah.

Nugroho (2019) melaporkan bahwa geopolimer yang dibuat dari abu layang tinggi kalsium antar 15 sampai 20% menghasilkan kuat tekan awal yang tinggi dan stabil dengan *setting time* antara 100 sampai 120 menit. Sebaliknya Faradila (2019) dan Pamungkas (2019) melaporkan bahwa geopolimer yang dibuat dari abu layang dengan kandungan kalsium kurang dari 10% tidak mengeras dalam waktu lebih dari 7 hari sehingga tidak membentuk pasta geopolimer. Dengan kandungan kalsium yang kurang dari 10% pada tiga abu layang yang digunakan dalam penelitian ini maka metode pembuatan geopolimer tidak dapat mengikuti metode sebelumnya (Faradila, 2019 dan Pamungkas, 2019). Selain kandungan kalsium, hasil analisis komposisi unsur penyusun dapat digunakan untuk menentukan tipe abu layang yang merupakan sifat kimia yang penting dalam pembuatan geopolimer abu layang.

Tabel 4.2 Komposisi unsur penyusun abu layang

No	Daftar Unsur	Kandungan %		
		PLTU Ketapang	PLTU Sanggau	PT. Wilmar
1	SiO <sub>2</sub>	40,42	38,09	51,02
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,45	23,1	20,8
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,49	15,17	11,64
4	CaO	9,31	8,74	4,7
5	MgO	5,45	5,5	1,42
6	Na <sub>2</sub> O	0,509	0,563	0,257
7	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,862	0,187	0,197
8	SO <sub>3</sub>	0,762	0,471	0,352
9	Cl	-	0,0513	-
10	K <sub>2</sub> O	0,879	0,851	0,684
11	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0019	0,0015	0,0025
12	TiO <sub>2</sub>	1,82	1,85	2,67
13	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0411	0,0412	0,0488
14	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,024	0,0235	0,0573
15	MnO	0,141	0,133	0,128
16	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,0082	0,0086	0,0056
17	NiO	0,0125	0,0142	0,0074
18	CuO	0,0069	0,0066	0,007
19	ZnO	0,0121	0,0127	0,0087
20	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003	0,003	0,0042
21	GeO <sub>2</sub>	-	0,00095	0,00063
22	SeO <sub>2</sub>	-	0,00062	-
23	Br	0,0017	0,0023	0,00066
24	Rb <sub>2</sub> O	0,0058	0,0056	0,0049
25	SrO	0,0414	0,0458	0,0486

Sesuai dengan ASTM C618 abu layang dikelompokkan sebagai tipe F apabila jumlah  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$  dan tipe C apabila jumlah  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 70\%$ . Tabel 4.2 menunjukkan jumlah persentase  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Berdasarkan Tabel 4.3 dapat disimpulkan bahwa semua abu layang yang digunakan dalam penelitian ini masuk ke dalam tipe F.

Ketiga abu layang yang digunakan pada penelitian ini juga mengandung  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dalam abu layang berasal dari jenis batubara yang digunakan. Jika diurutkan sesuai dengan kenaikan kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  maka abu layang PT. Wilmar adalah yang paling rendah sedangkan abu layang PLTU Sanggau adalah yang paling tinggi.

Kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pada abu layang akan membentuk  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  jika bereaksi dengan larutan basa yang membuat  $\text{OH}^-$  menghambat laju geopolimerisasi. Hal ini disebabkan karena abu layang tersebut akan mengalami kekurangan ion hidroksida dalam pelarutan silika dan alumina (Davidovits dkk., 2013). Ketiga abu layang tersebut memiliki kandungan besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  atau  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) cukup tinggi antara 11 sampai 15% yang seharusnya dapat mengurangi kuat tekan dari geopolimer yang terbentuk.

Tabel 4.3 Klasifikasi tipe abu layang berdasar data XRF

Keterangan	PLTU Ketapang (%)	PLTU Sanggau (%)	PT. Wilmar (%)
$\text{SiO}_2 +$ $\text{Al}_2\text{O}_3 +$ $\text{Fe}_2\text{O}_3$	73,36	76,36	83,46
Klasifikasi	Tipe F	Tipe F	Tipe F

LOI dari abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar masing-masing memiliki nilai 6,59, 4,98 dan 5,79%. Nilai LOI menunjukkan lebih banyak karbon atau senyawa lain yang tidak terbakar, yang dapat mengurangi kegunaan abu layang (Bhatt dkk., 2019). Ketiga abu layang memiliki kandungan LOI yang cukup banyak memungkinkan geopolimer tidak membentuk pasta.

#### **4.1.3 Ukuran Partikel Abu Layang**

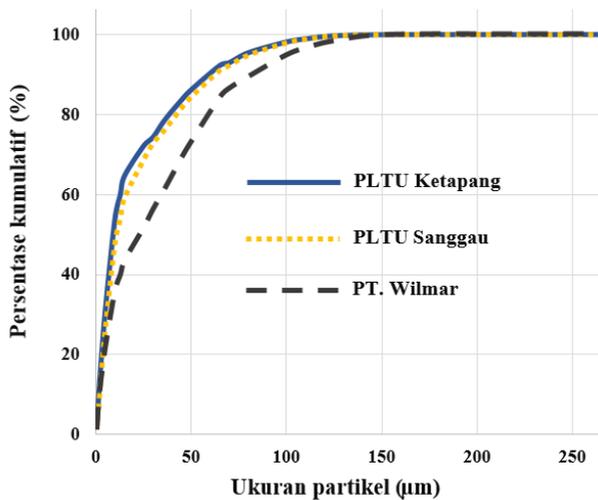
Ukuran partikel dapat menyebabkan laju reaksi geopolimerisasi yang berbeda-beda. Hal ini diakibatkan oleh proses pelarutan ion Si dan Al diawal tahap karena reaksi geopolimerisasi dimulai pada permukaan partikel abu layang. Oleh karena itu distribusi ukuran partikel yang optimal tetap menjadi parameter penting dalam keseluruhan reaktivitas abu layang untuk sintesis geopolimer (Tennakon dkk., 2015). Distribusi ukuran partikel memiliki efek yang potensial pada ketahanan geopolimer, dengan memahami distribusi ukuran partikel dapat memprediksi dan mengendalikan kekuatan tekan. Distribusi ukuran partikel dan luas permukaan partikel abu layang dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.2.

Sifat fisika terutama distribusi ukuran partikel sangat mempengaruhi kuat tekan dari geopolimer yang terbentuk. Komljenovic (2010) menjelaskan bahwa semakin banyak partikel yang berukuran besar pada abu layang yang disintesis menjadi geopolimer, abu layang akan sulit untuk larut sempurna dalam larutan basa pengaktif sehingga dapat mempengaruhi kuat tekan dari geopolimer. Berdasarkan Tabel 4.4 abu layang dari PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar tidak berbeda secara signifikan. Hal tersebut dapat dilihat pada ukuran 150  $\mu\text{m}$ . Ukuran dibawah 150  $\mu\text{m}$  sudah mencapai 99,8 % untuk ketiga abu layang. Ukuran partikel abu layang yang heterogen atau tidak seragam ini dapat

mempengaruhi sifat mekanik dari geopolimer yaitu dapat menurunkan nilai kekuatan dari geopolimer.

Tabel 4.4 Sifat fisik abu layang

Parameter	PLTU Ketapang	PLTU Sanggau	PT. Wilmar
Diameter 50% (d50)	7,4	11,3	24,6
Luas Permukaan (m <sup>2</sup> /g)	0,477	0,38	0,366

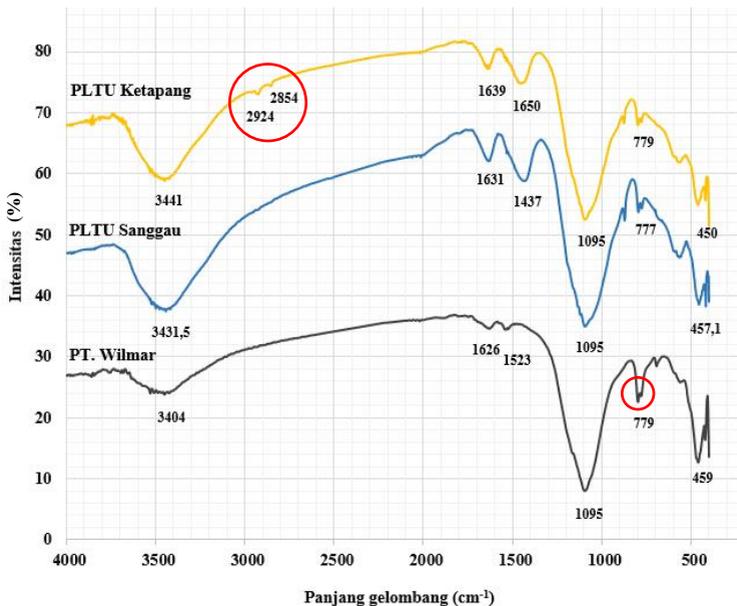


Gambar 4.2 ukuran partikel abu layang

#### 4.1.3 Gugus Fungsi Ikatan Partikel Abu Layang

Analisa gugus fungsi ikatan partikel abu layang ini dilakukan karena pada penelitian Faradila (2019) dan Pamungkas (2019) tidak membentuk pasta geopolimer.

Suarnita (2009) menyebutkan bahwa senyawa lain yang terkandung pada abu layang seperti minyak, atau senyawa organik yang terisisa dapat mempengaruhi kuat tekan dari geopolimer. Gambar 4.3 merupakan spektra FTIR dari abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar



Gambar 4.3 Spektra FTIR abu layang

Parameter dari senyawa organik yang berupa lemak atau minyak adalah ditemukannya ikatan C-O, C-C atau pun C=O pada panjang gelombang 1050-1300, 950 dan 1670 cm<sup>-1</sup> (Fessenden and Fesenden, 1986). Pada uji yang dilakukan, disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan diantara ketiga sampel tersebut baik dari abu layang PLTU Ketapang,

PLTU Sanggau dan PT. Wilmar dan tidak ditemukan adanya kontaminasi senyawa organik pada abu layang.

Puncak-puncak lain seperti pada  $3412$  dan  $1622\text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi dari OH dan H-O-H. Puncak di  $1383\text{ cm}^{-1}$  merupakan vibrasi deformasi C-O, Gugus fungsi C-O ini merupakan hasil  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dimana terbentuk dari karbonasi geopolimer yang kaya NaOH.  $1103\text{ cm}^{-1}$  merupakan puncak *stretch* Si-O tetrahedral. Puncak  $750$  dan  $458\text{ cm}^{-1}$  adalah representasi dari vibrasi Si-O-Si/ Si-O-Al dan Al-O/ Si-O. Puncak pada Gambar 4.3 yang diberi lingkaran merah yaitu puncak  $2854\text{-}2924\text{ cm}^{-1}$  pada spektra infra merah abu layang PLTU Ketapang kemungkinan besar merupakan vibrasi *stretching* dari H-C-H simetrik dan asimetrik. H-C-H ini didapatkan dari LOI abu layang PLTU Ketapang yang banyak mengandung karbon hidrofobik maupun hidrofilik yang tidak terbakar dalam tungku pembakaran, sedangkan puncak tajam  $779\text{ cm}^{-1}$  pada spektra infra merah PT. Wilmar kemungkinan besar merupakan vibrasi dari Si-O-Si yang berasal dari kandungan kuarsa. Vibrasi kristal kuarsa ditemukan di puncak  $798$  dan  $779\text{ cm}^{-1}$  (Erol dkk., 2013).

#### **4.1.4 Kandungan Kalori pada Abu Layang**

Kandungan Kalori pada partikel abu layang diuji dengan menggunakan Bomb Calorimeter ICA C200 laboratorium fundamental Departemen Kimia-ITS. Uji ini dilakukan untuk melakukan verifikasi pada uji FTIR dan XRF dan memastikan adanya senyawa yang dapat menghasilkan kalori pada abu layang. Abu layang yang menghasilkan kalori tidak membentuk geopolimer dengan kuat tekan tinggi karena adanya partikel yang tidak terbakar sempurna pada mesin burner PLTU.

Senyawa nitrat atau karbonat dapat menguap pada proses pengeringan (MSDS, 2014). Hasil dari pengujian bomb

kalorimeter didapatkan bahwa abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar tidak menghasilkan kalori sama sekali dan LoI pada hasil karakterisasi XRF dapat dipastikan bukan senyawa yang akan menghambat proses sintesis geopolimer. Sehingga ketiga abu layang seharusnya dapat disintesis dan membentuk pasta geopolimer.

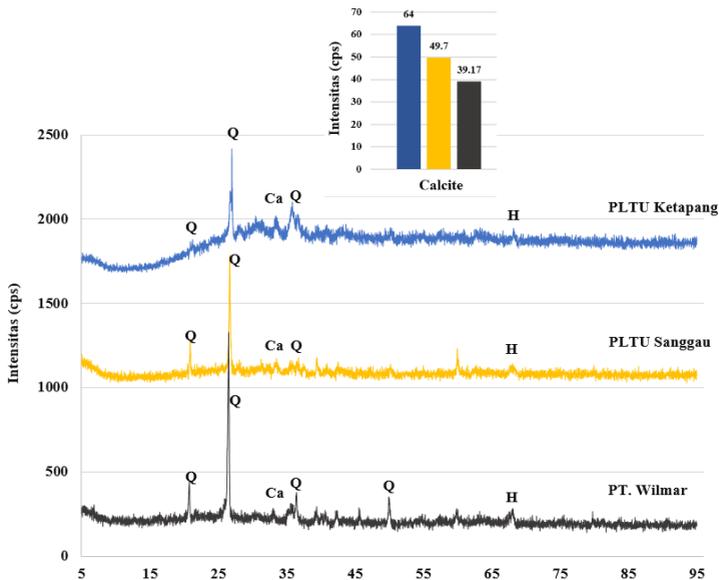
#### **4.1.5 Komposisi Fase Mineral dan Kekristalan**

Komposisi fasa mineral dan kekristalan abu layang dianalisis 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 kuarsa, mullite, hematite, dan calcite. Fase kristal ini pada dasarnya inert, dan hanya fase amorf yang akan bereaksi dengan kalsium hidroksida ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) untuk membentuk hidrat semen (Thomas dkk., 2007). Berdasarkan hasil analisis difraksi abu layang memiliki kandungan fasa amorf dan mineral utama kuarsa (Q) dan mullite (M) yang merupakan sumber utama silika dan alumina (Querol dkk., 2002). Mullite merupakan fasa yang terbentuk dari silika dengan alumina. Kedua komponen ini berperan aktif dalam pembentukan ikatan dalam geopolimer (Rommel dkk., 2014). Kebanyakan fasa mullite ada sebagai padatan kecil dan didistribusikan secara luas dalam partikel abu layang (Wang dan Ishida, 2019). Gambar 4.4 menunjukkan difraktogram abu layang dari PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar.

Difraktogram pada Gambar 4.4 menunjukkan pola difraksi yang relatif sama untuk puncak khas dari abu layang yaitu terdapat puncak khas kuarsa (Q) secara berurutan berada di  $2\theta$ : 26,74, 26,50 dan 26,66° pada masing-masing abu layang. Selain itu pada ketiga abu layang terdapat puncak khas yang

lain yaitu mullite (M) dan calcite (Ca). Dari ketiga jenis abu layang juga memiliki banyak puncak tajam yang menunjukkan kristalinitas yang tinggi. Perbandingan dari intensitas Calcite sebanding dengan kandungan CaO pada tiap abu layang. Kristal *calcite* yang ada pada abu layang berpengaruh terhadap kuat tekan geopolimer. Adanya kandungan kalsium yang tinggi pada abu layang mendukung proses pengerasan. Ion kalsium memiliki peran pada pembentukan matriks geopolimer yang lebih cepat dan menghasilkan struktur mikro yang lebih padat dan kekuatan tekan yang tinggi (Kaja dkk, 2018). Kristal *calcite* paling banyak terdapat pada abu layang PLTU Ketapang dan paling sedikit ditemukan pada abu layang PT. Wilmar, sehingga seharusnya geopolimer yang paling tinggi kuat tekannya adalah yang berbahan baku abu layang PLTU Ketapang.

Kusumawati dan Widiarti (2015) menjelaskan bahwa puncak-puncak tajam dan tinggi pada abu layang menunjukkan fasa kristalin yang tidak reaktif karena adanya fasa kristalin yang tinggi dapat menyebabkan ikatan yang reaktif dari kelarutan silika dan alumina terbentuk tidak sempurna bahkan gagal terbentuk. Sehingga proses geopolimerisasi tidak membentuk pasta geopolimer dapat terjadi pada abu layang tersebut yakni PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar yang tidak cukup banyak ditambahi  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .



Gambar 4.4 Difraktogram sinar-X abu layang PLTU Ketapang (•), PLTU Sanggau (•) dan PT. Wilmar (•)

#### 4.1.6 Morfologi Abu Layang

Morfologi dari abu layang dapat diketahui dengan SEM. Selain morfologi, analisis SEM juga dapat mengetahui distribusi dan ukuran partikel abu layang. Distribusi ukuran partikel abu layang memainkan peranan penting dalam sifat mekanik geopolimer. Supriadi (2017) menjelaskan bahwa bentuk morfologi dari abu layang adalah bola dengan ukuran partikel diperkirakan antara 1-100 $\mu\text{m}$ . Ukuran yang berbeda-beda dan tersebar secara heterogen diakibatkan karena saat melewati daerah pembakaran (burning zone) pada pembangkit

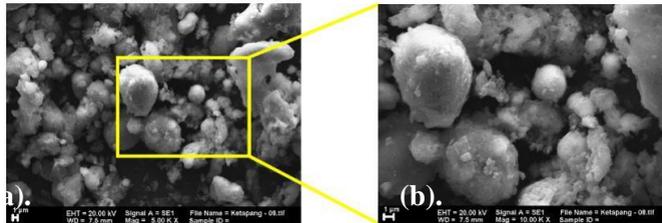
listrik setiap partikel batubara mengalami perubahan sifat kimia dan fisika yang berbeda-beda.

Ukuran dan bentuk dari partikel abu layang sangat mempengaruhi kereaktifan dalam proses geopolimerisasi. Semakin kecil dan tidak beraturan bentuk partikel dari abu layang, maka semakin reaktif (mudah larut dalam asam atau basa) dikarenakan luas permukaan bidang sentuh dengan pelarut yaitu larutan alkali (NaOH) sebagai larutan pengaktif basa semakin besar (Kusumawati dan Widiarti, 2015).

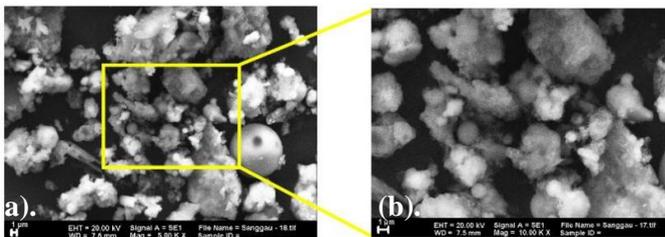
Dari karakterisasi SEM yang dilakukan, morfologi abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar memiliki bentuk yang didominasi dengan partikel abu layang tidak beraturan. Gambar 4.4 (a) merupakan mikrograf abu layang PLTU Ketapang dengan perbesaran 10.000 kali dan Gambar 4.4 (b) merupakan perbesaran dua kali dari Gambar 4.4 (a). Gambar 4.5 (a) adalah mikrograf abu layang PLTU Sanggau dengan perbesaran 10.000 kali dan Gambar 4.5 (b) merupakan perbesaran dua kali dari Gambar 4.5 (a), sedangkan Gambar 4.6 (a) merupakan mikrograf abu layang PT. Wilmar dengan perbesaran 10.000 kali dan Gambar 4.6 (b) merupakan perbesaran 3,5 kali dari Gambar 4.6 (a). Abu layang PLTU Ketapang memiliki bentuk bentuk partikel yang hamper seimbang antara partikel tidak beraturan dan yang berbentuk bola (*spherical*). Bentuk mikrograf pada abu layang PLTU Sanggau didominasi partikel tidak beraturan daripada yang berbentuk bola (*spherical*), sedangkan PT. Wilmar memiliki bentuk yang mirip PLTU Sanggau namun dengan ukuran yang lebih heterogen. Mikrograf ketiga abu layang ini menguatkan hasil uji PSA dimana abu layang PLTU Ketapang dan Sanggau memiliki ukuran yang lebih homogen daripada PT. Wilmar, meskipun ketiganya banyak terdapat partikel tidak berturan.

Pamungkas (2019) menjelaskan bahwa ukuran partikel yang heterogen menyebabkan jarak antar partikel menjadi lebar

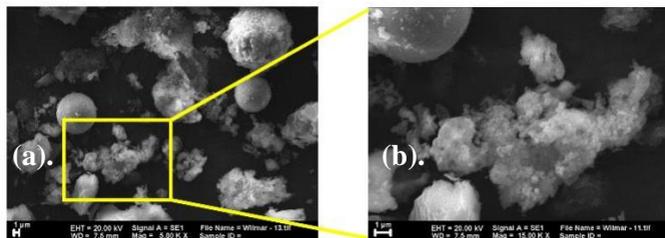
dan kereaktifan menjadi rendah sehingga probabilitas untuk membentuk ikatan dalam pasta geopolimer juga sangat rendah yang pada akhirnya tidak membentuk geopolimer ketika disintesis, sehingga memungkinkan abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar tidak membentuk pasta geopolimer.



Gambar 4.5 Mikrograf abu layang PLTU Ketapang



Gambar 4.6 Mikrograf abu layang PLTU Sanggau



Gambar 4.7 Mikrograf abu layang PLTU Wilmar

#### 4.2 Karakteristik Geopolimer yang dihasilkan

Ada Sembilan variasi yang dilakukan pada penelitaian ini. Variasi ini dilakukan untuk mendapatkan geopolimer karena hasil penelitian sebelumnya yang dilaporkan Faradila (2019) dan Pamungkas (2019) menunjukkan bahwa abu layang dengan kadar kalsium rendah tidak dapat membentuk geopolimer. Tabel 4.5 menyajikan secara ringkas hasil percobaan dari sembilan variasi yang dilakukan. Dari kesembilan variasi tersebut dihasilkan gel pasta geopolimer pada penambahan 32 dan 41%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Dan campuran fasa padat dan basa pengaktif tidak membentuk pasta geopolimer pada penambahan 19%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .



Gambar 4.8 Proses pencetakan pasta geopolimer dalam cetakan silinder.

Sintesis geopolimer dilakukan dengan cara mencampurkan fase padatan yang merupakan campuran dari abu layang dan  $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$  dan basa pengaktif yang merupakan campuran dari  $\text{NaOH}$  dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .

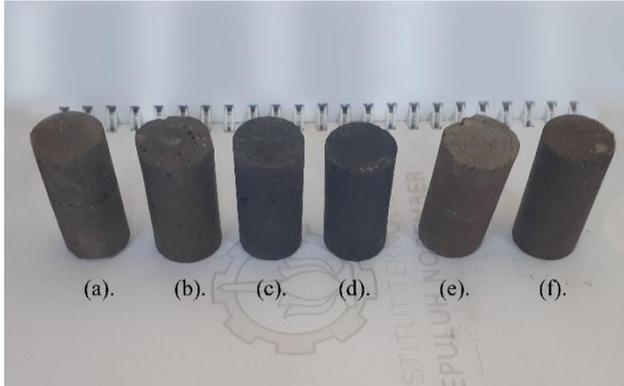
Abu layang setelah dicampur dengan larutan basa pengaktif membentuk pasta geopolimer. Pasta geopolimer ini memiliki ciri fisik yang berbeda dari setiap variasinya yang disajikan dalam Tabel 4.6. pasta yang didapat dicetak ke dalam

cetakan silinder dengan perbandingan 1 : 2 untuk diameter : tinggi. Sifat-sifat fisik pasta geopolimer yang dihasilkan dari proses pencampuran juga disajikan pada Tabel 4.5. Pasta yang memiliki karakteristik seperti pasir laut ditekan seperti mencetak paving sehingga memadat seperti pada Gambar 4.8. Sedangkan untuk pasta yang memiliki karakteristik kental dicetak menggunakan sendok dan dimampatkan dengan pangkal sendok. Pasta geopolimer selanjutnya dibiarkan dalam suhu ruang hingga mengeras (*setting-time*). Setiap geopolimer memiliki waktu yang berbeda-beda tergantung pada karakteristik abu layang. Abu PT. Wilmar, PLTU Ketapang dan PLTU Sanggau memiliki kandungan kalsium yang rendah sehingga memiliki *setting time* yang relatif lama.

Gambar 4.9 menunjukkan foto geopolimer yang berhasil disintesis dari PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar dengan variasi penambahan 32 dan 41 %  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Pada variasi penambahan 19%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , Abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar tidak membentuk pasta geopolimer. Penelitian Faradila (2019) menjelaskan hal ini disebabkan karena jumlah  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang digunakan tidak cukup banyak untuk melarutkan abu layang yang tersedia. Gambar 4.10 merupakan bentuk dari abu layang dan basa pengaktif yang tidak membentuk pasta geopolimer.

Geopolimer yang telah berhasil disintesis, didiamkan dalam cetakan sampai waktu pengikatannya berakhir. Setelah waktu pengikatan berakhir selanjutnya geopolimer dikeluarkan dari cetakan dan dimasukkan ke dalam kantong plastik klip untuk menghindari hilangnya air melalui penguapan. Penguapan yang berlebihan dapat menyebabkan keretakan pada geopolimer. Setelah dimasukkan kedalam plastik, kemudian geopolimer dipanaskan dalam oven atau dilakukan temperature curing pada suhu  $55\text{ }^\circ\text{C}$  selama 24 jam. Setelah itu

sampel geopolimer dibiarkan pada suhu ruang selama 7 hari yang kemudian diukur kekuatannya.



Gambar 4.9 Geopolimer: (a). PLTU Sanggau (32%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), (b). PLTU Sanggau (41%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), (c). PT Wilmar (32%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), (d). PLTU Wilmar (41%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), (e). PLTU Ketapang (32%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan (f). PLTU Ketapang (41%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )



Gambar 4.10 Abu layang: a). PLTU Ketapang, (b). PLTU Sanggau dan (c). PT. Wilmar yang gagal membentuk geopolimer

Tabel 4.5 Hasil pengamatan sintesis geopolimer

Jenis Abu Layang	Kadar $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (m/m) (%)	Geopolimer
PLTU Ketapang	19	Tidak terbentuk geopolimer
	32	Terbentuk geopolimer
	41	Terbentuk geopolimer
PLTU Sanggau	19	Tidak terbentuk geopolimer
	32	Terbentuk geopolimer
	41	Terbentuk geopolimer
PT. Wilmar	19	Tidak terbentuk geopolimer
	32	Terbentuk geopolimer
	41	Terbentuk geopolimer

#### 4.2.1 Kuat Tekan

Geopolimer dengan umur 7 hari akan diuji kualitasnya dengan dilakukan uji kuat tekan. Uji kuat tekan menggunakan alat pengujian Universal Testing Machine di Laboratorium Beton Teknik Infrastruktur ITS. Kuat tekan merupakan pengujian fisik dan merupakan salah satu faktor penentu kualitas dari geopolimer. Karena pada aplikasinya, kuat tekan ini yang menjadi standar penentuan mutu SNI dari produk bahan

bangunan berbahan dasar semen Portland seperti beton, bata ringan, paving dan lainnya.

Data yang didapatkan dari pengukuran diperoleh dari masa beban yang dapat ditanggung oleh sampel geopolimer per satuan luas dari sampel tersebut dengan satuan Mpa. Preparasi dari pengujian ini dilakukan dengan meratakan permukaan atas dan bawah geopolimer menggunakan amplas 100 grid. Pengamplasan ini juga bertujuan untuk mengurangi deviasi error pada pengukuran kuat tekan. Geopolimer yang tidak dihaluskan memiliki kemiringan yang bermacam-macam, sehingga menghasilkan sudut ketika ditekan dari atas. Sudut pada gaya tekan dari atas akan menghasilkan deviasi pada pengukuran. Gambar geopolimer yang telah diratakan disajikan dalam Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Foto geopolimer yang telah diratakan permukaan atas dan bawahnya.

Geopolimer yang diberikan gaya tekanan ( $F$ ) perlahan-lahan sebelum kemudian mengalami keretakan dan pecah. Gaya kuat tekan maksimal yang ada pada monitor inilah yang dilaporkan sebagai hasil kekuatan tekan. Gaya tekan yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi kuat tekan ( $P$ ) dengan

satuan MPa. Beton yang diproduksi secara umum yang biasa diketahui memiliki standar uji kuat tekan sebesar 18 MPa dengan mutu K-225 (Badan Standardisasi Nasional, 2013).

Tabel 4.6 merupakan hasil pengujian kekuatan tekan dari geopolimer abu layang rendah kalsium dari PLTU Ketapang dan PLTU Sanggau dan PT. Wilmar. Data kuat tekan penambahan 19%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  tidak ditampilkan karena pada komposisi tersebut tidak didapatkan geopolimer. Penambahan 32%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  menghasilkan kuat tekan yang lebih besar daripada pada variasi penambahan lainnya yakni 21,6 MPa pada PLTU Ketapang, 12,08 MPa pada PLTU Sanggau dan 8,90 MPa pada PT. Wilmar. Hal ini dikarenakan paduan antara basa pengaktif, jumlah abu layang dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  pada rasio yang tepat. Penambahan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang kurang tidak dapat membentuk pasta geopolimer selain kurangnya viskositas yang dihasilkan juga karena jumlah basa pengaktif yang tidak cukup banyak untuk mengikat abu layang. Pada penambahan tersebut justru mengalami penurunan yang signifikan pada semua jenis abu layang. Pada grafik tersebut juga didapatkan bahwa PLTU Ketapang dengan penambahan 32%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  memiliki kuat tekan awal yang tinggi daripada sumber abu layang lainnya dikarenakan adanya kandungan CaO yang tinggi. Grafik kuat tekan geopolimer dengan penambahan 32%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan 41%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  serta perbandingannya dengan kandungan kristal *calcite*, kadar CaO, kadar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  disajikan dalam Gambar 4.12. Profil kuat tekan ketiga geopolimer dibandingkan dengan profil kadar CaO, kadar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan intensitas kristal *calcite* dan didapatkan bahwa profil yang hampir sama terlihat pada kadar kristal *calcite*, sehingga dapat disimpulkan bahwa kemungkinan besar kuat tekan sangat bergantung pada kandungan kristal *calcite* yang ada pada abu layang.

Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kekuatan tekan yakni kandungan CaO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , *setting time*,

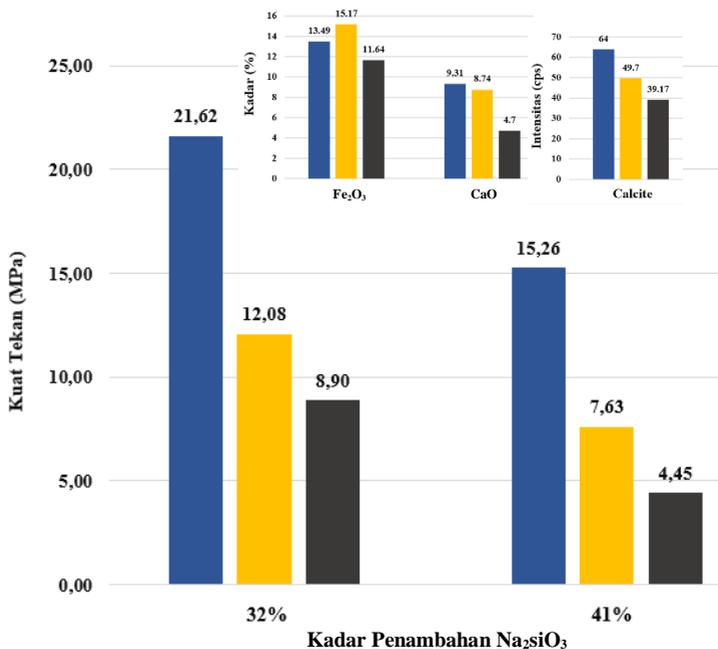
Si/Al, proses pembakaran abu layang, pengamplasan dan lain-lainnya. Pada penelitian ini, perbedaan hasil kuat tekan dikarenakan perbedaan kandungan dari sumber abu layang yang digunakan. Fansuri dkk. (2008) melaporkan bahwa abu layang yang didapatkan pada tempat yang sama bisa jadi memiliki hasil yang berbeda pula. Selain itu pada proses pencetakan geopolimer ke dalam cetakan yang tidak rata juga mempengaruhi hasil kuat tekan, sehingga perlu pengamplasan agar permukaan menjadi rata dan sesuai dengan tinggi agar didapatkan kuat tekan yang representatif. Oleh karena itu, didapatkan kesimpulan bahwa dengan penambahan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang optimal adalah 32% pada ketiga abu layang dan abu layang dari PLTU Ketapang memiliki nilai kuat tekan terbesar yaitu 21,62 MPa.

Tabel 4.6 Kuat Tekan (MPa) Geopolimer Abu Layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar

Pengulang an sampel ke-	PLTU Ketapang		PLTU Sanggau		PT. Wilmar	
	32% (MPa)	41% (MPa)	32% (MPa)	41% (MPa)	32% (MPa)	41% (MPa)
1	31.80	19.08	12.72	6.36	9.54	3.18
2	28.62	12.72	9.54	6.36	9.54	3.18
3	15.90	15.90	12.72	6.36	6.36	6.36
4	19.08	6.36	12.72	9.54	9.54	3.18
5	12.72	22.26	12.72	9.54	9.54	6.36
<b>rata-rata</b>	<b>21.62</b>	<b>15.26</b>	<b>12.08</b>	<b>7.63</b>	<b>8.90</b>	<b>4.45</b>
std. deviasi	8.23	6.12	1.42	1.74	1.42	1.74

Geopolimer dari abu layang rendah kalsium PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar yang terbentuk memiliki kuat tekan maksimal berturut-turut 21,62, 12,08 dan 8,90 MPa pada penambahan 32%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . SNI beton K-225

sendiri adalah 18 MPa sehingga hanya geopolimer dari PLTU Ketapang yang masuk kualifikasi (Badan Standardisasi Nasional, 2013). Geopolimer dari PLTU Sanggau dan PT. Wilmar masuk dalam kualifikasi Paving mutu D dengan interval kuat tekan 8 – 10 MPa (Badan Standardisasi Nasional, 1996). Geopolimer dari abu layang PT. Wilmar dengan kuat tekan geopolimer terendah 4,45 MPa masih masuk dalam baku mutu bata ringan (Badan Standardisasi Nasional, 2002).



Gambar 4.12 Kuat tekan geopolimer dengan penambahan 32 dan 41%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  geopolimer abu layang PLTU Ketapang (●), PLTU Sanggau (●) dan PT. Wilmar (●)

#### 4.3.2 Uji *Setting time*

Pengujian dilakukan untuk mengetahui *setting time* dari tiap variasi komposisi pada geopolimer. Metode ini juga merupakan Analisa fisika dari geopolimer yang dilakukan dengan menancapkan jarum vikat yang memiliki panjang 5 cm dan diukur panjang jarum yang masuk pada sampel geopolimer. Selain untuk mengetahui *setting time*, pengujian ini juga dapat menjelaskan perilaku geopolimer selama proses hidrasi berlangsung. Tabel dari *setting time* abu layang disajikan pada Tabel 4.7

Tabel 4.7 Waktu pengikatan (jam) geopolimer abu layang PLTU Ketapang, PLTU Sanggau dan PT. Wilmar.

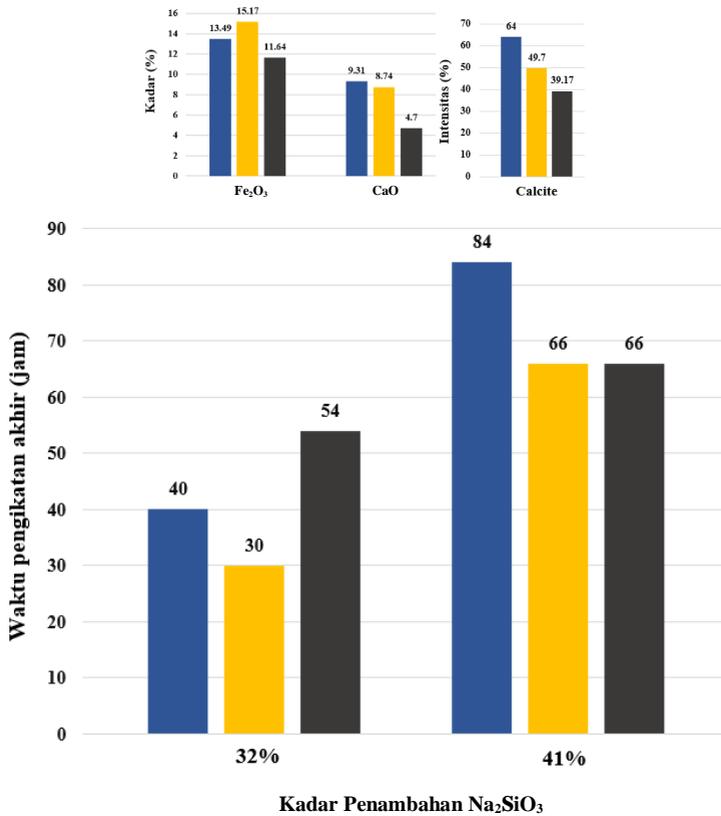
Waktu (jam)	PLTU Ketapang		PLTU Sanggau		PT. Wilmar	
	32% (cm)	41% (cm)	32% (cm)	41% (cm)	32% (cm)	41% (cm)
0	0.7	4	0.2	4	4	4
20	0.7	4	0.1	4	0.4	4
30	0.7	4	0	4	0.4	4
40	0	4	0	4	0.1	4
54	0	4	0	4	0	4
60	0	4	0	4	0	4
66	0	1.2	0	0	0	4
84	0	0	0	0	0	0

Penambahan 32%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  menghasilkan *setting time* lebih cepat daripada 41%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dikarenakan bentuk dari pasta yang memang sudah memiliki tekstur seperti pasir laut sehingga lebih cepat mengering. Geopolimer dari abu layang PLTU Sanggau memiliki final *setting time* lebih cepat dibanding geopolimer abu layang PT. Wilmar dan PLTU

Ketapang baik pada penambahan 32 atau 41%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Pada penambahan 32%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , geopolimer dari abu layang PLTU Sanggau hanya membutuhkan waktu 30 jam untuk mendapatkan pengukuran kedalaman 0,00 cm yang selanjutnya siap untuk dilakukan temperature curing. Lebih cepat daripada geopolimer yang berasal dari PT. Wilmar ataupun PLTU Ketapang yang masing-masing membutuhkan waktu 54 jam dan 40 jam. Hal yang sama juga terjadi pada penambahan 41%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , geopolimer dari abu layang PLTU Sanggau membutuhkan waktu 66 jam untuk mendapatkan pengukuran kedalaman 0,00 cm dan 84 jam untuk geopolimer dari abu layang PT. Wilmar dan PLTU Sanggau.

Supradi dkk. (2017) melaporkan bahwa  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dapat bereaksi dengan NaOH sehingga dapat mengurangi jumlah basa yang nantinya akan bereaksi membentuk polimer, keadaan ini membuat jumlah natrium silikat menjadi berkurang sehingga waktu pengikatan menjadi lebih pendek. Kaja dkk. (2018) juga menjelaskan bahwa adanya kandungan kalsium yang tinggi pada abu layang mendukung proses pengerasan dan pembentukan matriks geopolimer yang lebih cepat serta menghasilkan struktur mikro yang lebih padat dan kekuatan tekan yang tinggi, sehingga berpengaruh terhadap kecepatan waktu pengikatan geopolimer. Proses geopolimerisasi dapat dilihat pada Gambar 4.13. Gambar 4.14 merupakan perbandingan dari waktu akhir pengikatan geopolimer, kadar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , kadar kristal *calcite*, serta kadar CaO dalam abu layang. Pada gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa waktu pengikatan tidak hanya dipengaruhi oleh adanya  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , kristal *calcite* atau CaO saja, namun variabel-variabel tersebut berkaitan dan membuat waktu pengikatan geopolimer abu layang rendah kalsium menjadi lebih cepat dari penelitian sebelumnya (Faradila, 2019 dan Pamungkas, 2019).





Gambar 4.14 Waktu akhir pengikatan abu layang PLTU Ketapang (●), PLTU Sanggau (●) dan PT. Wilmar (●)

**“halaman ini sengaja dikosongkan”**

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

1. Penelitian ini menggunakan abu layang rendah kalsium dari PLTU Sanggau, PLTU Ketapang dan PT. Wilmar sebagai bahan dasar pembuatan geopolimer dengan kandungan CaO berturut-turut adalah 9,3, 18,7 dan 4,7%.
2. Ketiga abu layang menghasilkan pasta geopolimer pada variasi penambahan 32 dan 41% (m/m)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .
3. Kuat tekan dipengaruhi oleh kandungan kristal *calcite* dalam abu layang dan waktu pengikatan dipengaruhi oleh jumlah  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang ditambahkan.
4. Semua geopolimer yang terbentuk masuk dalam standar baku mutu produk bangunan meliputi beton, paving maupun bata ringan.

#### **5.2 Saran**

1. Sintesis geopolimer pada penelitian selanjutnya dalam batas 19 sampai 41% penambahan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yang lebih pendek intervalnya.
2. Sintesis pada penelitian selanjutnya juga dillakukan variasi penambahan air agar dapat diketahui pengaruh viskositas gel pasta geopolimer terhadap kuat tekan.

*“halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Adiputro, S.T. (2013). *Campuran Geopolimer Fly Ash Sebagai Material Mortar Perbaikan*, Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung.
- Amand L, E, dan Leckner B. (2001). *Cocombustion of Sewage Sludge with Wood/Coal in a Circulating Fluidized Bed Boiler-A Study of Gaseous Emissions*. Sweden. Department of Energy Conversion Chalmers University of Technology.
- Antoni, A., Wijaya, S. W., Hardjito, D. (2016). *Factors Affecting the Setting Time of Fly Ash-Based Geopolymer*. Materials Science Forum, 841, 2-8. doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.841.90
- Arini, R.N., dan Ekaputri, J.J., (2013). *Pasta Ringan Geopolimer Berbahan Dasar Lumpur Bakar Sidoarjo dan Fly Ash Perbandingan 3:1 Dengan Tambahan Aluminum Powder Dan Serat Alam*, Jurnal Teknik POMITS, 1-5.
- Arslan, A.A, Uysal, Mucteba, Yılmaz, Arın, Al-mashhadani M. M, Canpolat, Orhan, Sahin, Furkan, Aygörmez, Yurdakul. (2019). *Influence of wetting-drying curing system on the performance of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer composites*. Istanbul. Construction and Building Materials, 225, 909-926. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.235
- ASTM C 185-15A. (2015). *Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar*, American.

- ASTM C 618. (2005). *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan For Use as Mineral Mixture in Portland Cement Concrete*, American.
- ASTM C39-86. (2008). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American.
- ASTM C191-04. (2010). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. American.
- Badan Standardisasi Nasional. (1996). *SNI 03-0691-1996 Bata Beton (paving Blok)*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-2847-2002 Tata cara Perhitungan Struktur Untuk Bangunan Gedung (Beta Version)*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1974:2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). *SNI 2847:2013 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Bakrie, A. M. M., Kamarudin, H., BinHussain, M., & Nizar, I. K. (2011). *The Effect of Curing Temperature on Physical and Chemical Properties of Geopolymers*. 2011 International Conference on Physics Science and Technology, 286-291.  
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.045>

- Bakrie, A.M. Mustafa Al, Kamarudin, H., Binhussain, M., Nizar, I. K., Rafiza, A.R. and Zarina, Y. (2012) *The Processing, Characterization, and Properties of Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. Sci, 30, 90-97.
- Beckhoff, B., Kanggieber, B., Langhoff, N., Wedell, R., dan Wolff, H. (2007). *Reference-Free Total Reflection X-ray Fluorescence Analysis of Semiconductor Surfaces with Synchrotron Radiation*. Analytical Chemistry, 79 (20), 7873-82  
doi: 10.1021/ac071236p
- Bhatt, A., Priyadarshini, S., Mohanakrishnan, A.A., Abri, A., Sattler, M., Techapaphawit, S. (2019). *Physical, Chemical, and Geotechnical Properties of Coal Fly Ash: a Global Review*. Case Studies in Construction Materials, 11.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00263>
- Chang R. (2003). General Chemistry: *The Essential Concepts*, alih bahasa: Indra Noviandri et.al. 2004. Kimia Dasar Jilid I, Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Chu, Kia Wang. (1986). *Desain Beton Bertulang*, Jilid1, Edisi Keempat, Erlangga, Jakarta.
- Chindapasirt P, Chareerat T, and Sirivivatnanon VJ. (2007). *Cem and Conc Composites*, 29, 224-229.
- Chindapasirt, P., T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon. (2007). *Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer*. Paris. Cement and Concrete Composites, 224-229.
- Damayanti, Retno. (2018). *Abu Batubara dan Pemanfaatannya: Tinjauan Teknis Karakteristik*

*Secara Kimia dan Toksikologinya*. Bandung. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 14, 213-231.

- Davidovits J. (1976). *Solid-Phase synthesis of a mineral blockpolymer by low temperature polycondensation of Stockholm*, Sweden, August 30-September 1, 1976, Topic III "New Polymers of High Stability". Reference: Databank PASCAL (CNRS France) 77-6-0175065, published in Applied Polymer Symposia, 1978.
- Davidovits, J. (1988). *Geopolymers of the First Generation: SILIFACE-Process*. Geopolymer '88, 1, 49-67.
- Davidovits, J. (1994). *Properties of Geopolymer Cements*. Saint-Quentin. Alkaline Cement and Concretes, KIEV Ukraine.
- Davidovits, J. (1991). *Geopolimer: Inorganic Polymeric New Materials*, *Journal of Thermal Analysis*. 37, 1633-1656.
- Davidovits, J. (2013). *Geopolymer Cement a review*, Geopolymer Science and Technics. Geopolymer Institute Library.
- Dipohusodo, I. (1996). *Manajemen Proyek dan Kontruksi* (I ed.). Yogyakarta: Kanisius.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L. (2007). *Geopolymer technology: the current state of the art*, J. Mater. Sci, 42, 2917-2933.
- Erol, I. Vedat, D. Aydin, H. Suphi, U. (2013). *Pneumoconiosis and Quartz Content of Respirable Dust in Coal Mines in Zonguldak, Turkey*. International Journal of Coal Geology. 116-117, 26-35

- Faradila, F.S. (2019). *Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang dari Empat PLTU: Holcim, Paiton 1-2, Ketapang dan Wilmar*. Skripsi. Departemen Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Fansuri, H., Swastika, N. dan Atmaja, L. (2008). *Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton*, Akta Kimindo, 3, 61-66.
- Fessenden, R.J. and J.S. Fessenden. (1986). *Kimia Organik Dasar Edisi Ketiga. Jilid 1*. Terjemahan oleh A.H. Pudjaatmaka. Erlangga. Jakarta.
- Fessenden, R.J. and J.S. Fessenden. (1986). *Kimia Organik Dasar Edisi Ketiga. Jilid 2*. Terjemahan oleh A.H. Pudjaatmaka. Erlangga. Jakarta.
- Gunasekara, David W. Law, Sujeeva,S. (2015). *A comparative study of durability characteristics and microstructure of five different fly ash based geopolymer concrete*, Proceedings of 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC14), Beijing, China.
- Gunasekara, D.W., Law, Sujeeva, S. (2015). *The effect of type of fly ash on mechanical properties of geopolymer concrete*, Proceedings of Concrete 2015. Melbourne, Australia.
- Haryanti, N.H. (2014). *Uji Abu Terbang PLTU Asam Asam Sebagai Bahan Pembuatan Bata Ringan*. Jurnal Fisika FLUX, 11, 127-137.
- Haryanti, L. Mukti, R. Kadja, G., (2019). *Preparation of alkali-activated fly ash-based geopolymer and their application in the adsorption of copper (II) and zinc (II) ions*. MATEC Web of Conferences.

- Incropera, F. P. (1996). *Fundamental of Heat and Mass Transfer, 4<sup>th</sup> Edition*. Canada: John Willey and Sons Inc.
- James, P.M.S. (1991). *Prinsiples, Methods and Application of Particle Size Analysis*. Cambridges: Cambridge University Press.
- Ji, Z. Pei, Y. (2019). *Geopolymers produced from drinking water treatment residue and bottom ash for the immobilization of heavy metals*. Beijing. Chemosphere, 225, 579-587.
- Johan, A. (2009). *Karakterisasi Sifat Fisik dan Mekanik Bahan Refraktori  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pengaruh Penambahan TiO<sub>2</sub>*. Jurnal Penelitian Sains, 12, 1-8.
- Kaja, A.M., Lazaro, A., dan Yu, Q.L. (2018). *Effect of Portland Cement on Activation Mechanism of Class F Fly Ash Geopolymer Cured Under Ambient Conditions*. Construction and Building Materials, 189, 1113-1123. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.065
- Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2017). Nomor 10 tentang *Pokok-Pokok dalam Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik*. Jakarta.
- Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2018). *Laporan Kinerja Kemnterian ESDM 2018*. Jakarta. www.esdm.go.id
- Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2018). *Outlook Energi Indonesia 2018*. Jakarta. ISSN 2527-3000 www.esdm.go.id

- Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2018). *Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negera (Persero) Tahun 2018 s.d 2027*. Jakarta.
- Khale, Divya, and Rubina, C., (2007). *Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review*. Journal of Materials Science, 42, 729-746.
- Komljenovic, M., Z. Bascarevic, and V. Bradic. (2010). *Mechanical and microstructural properties of alkaliactivated fly ash geopolymers*. Journal of Hazardous Materials, 181, 35-42.
- Komljenovic, M. (2015). *Mechanical strength and Young's modulus of alkali-activated cement-based binders*. Woodhead Publishing.
- 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 Aluminium*. Prosiding Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir. Yogyakarta.
- Kusumawati, E., dan Widiarti, N. (2015). *Sintesis Geopolimer Berbusa Berbahan Dasar Abu Layang BatuBara dengan Hidrogen Peroksida sebagai Foaming Agent*. Jurnal Sains dan Teknologi, 13, 17-28.  
doi: 10.15294/saintekno.v12i2.5394
- Lahoti, M., Tan, K.H., Yang, E.Y. (2019). *A Critical Review of Geopolymer Properties for Structural Fire-Resistance Applications*. Pilani. Construction and Building Materials. 221, 514-526.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.076>

Liang, G. Zhu, H. Zhang, Z. Wu, Q. (2019). *Effect Of Rice Husk Ash Addition On The Compressive Strength And Thermal Stability Of Metakaolin Based Geopolymer*. *Yancheng, Construction and Building Materials*, 222, 872-881.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.200>

Lloyd, N. A. dan Rangan, B. V. (2010). *Geopolymer Concrete with Fly Ash*, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 3, 1493-1504.

L.J. Murdock dan K.M. Brook. (1979). *Bahan dan Praktek Beton*. Erlangga: Jakarta.

Malhotra, VM. (2002). *ACI Concrete International*, 24.

Manuahe, R., Sumajouw, M.D., dan Windah, R.S. (2014). *Kuat Tekan beton Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash)*. *Jurnal Sipil Stastik*, 2, 277-282.

doi: ISSN: 2337-6732

Mehta, A., dan Siddique, R. (2017). *Sulfuric Acid Resistance of Fly Ash based Geopolymers concrete*. *Construction and Building Materials*, 146, 136-143

Murdock, L. J, L. M. Brock dan Stephanus Hendarko, (1986). *Bahan dan Praktek Beton, Edisi Ke-4*. Erlangga, Jakarta.

MSDS 2014. <https://fscimage.fishersci.com/msds/89497.htm>

Mse.iastate.edu : *How The SEM Works*

- Nadeem, M. Ul-Haq, E. Ahmed , F. Rafiq, M.A, Awan, G.H., Abdein, M. Z. (2020). *Effect Of Microwave Curing On The Construction Properties Of Natural Soil Based Geopolymer Foam*. Lahore. Construction and Building Materials, 230.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117074>
- Nath, S.K., Kumar, S. (2017). *Reaction kinetics, microstructure and strength behavior of alkali activated silico-manganese (SiMn) slag – Fly ash blends*, J. Constr. Build. Mater., 147, 371-379.
- Nugroho, D. T. (2019). *Optimalisasi Rasio Mol SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam Pembuatan Geopolimer Berbasis Abu Layang Berkadar Kalsium Tinggi*. Skripsi. Departemen Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Pamungkas, C. I.B. (2019). *Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang dari Tiga PLTU: Indramayu, Asam-Asam dan Sanggau*. Skripsi. Departemen Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Palomo, A. Alonso, S. Ana , Jimenez, F. Isabel, S. Sanz, J. (2004). *Alkaline Activation of Fly Ashes: NMR Study of the Reaction Products*. Journal of the American Ceramic Society, 87, 1141-1145.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2014). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 tentang *Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Jakarta.
- Presiden Republik Indonesia. (2017). Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 14 Tahun 2017 tentang *Perubahan atas Peraturan Presiden Nomor 4 Tahun*

*2016 Tentang Percepatan Pembangunan Infrastruktur Ketenagalistrikan*. Jakarta.

Phair, J.W., dan Van Deventer, J.S.J., (2001), *Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers*. Miner. Eng., 14, 289-304.

doi:10.1016/S0892-6875(01)00002-4

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.

Rommel, E., Kurniawati, D., dan Pradipta, A. P. (2014). *Improvement of The Physical Properties and Reactivity of Fly Ash As Cementitious On Concrete*. Media Teknik Sipil, 12.

doi:10.22219/jmts.v12i2.2282

Sari, D. K. (2018). *Kajian Karakteristik Kimia Dan Fisika Abu Layang Yang Menjadi Penentu Kekuatan Mekanik Perekat Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang*. Skripsi. Departemen Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Sastrohamidjojo, H. (1992). *Spektroskoipi Inframerah, Edisi Pertama*, Liberty, Yogyakarta

Sibilia, J. P. (1996). *A Guide to Materials Characterization and Chemical analysis, second edition*, Wiley-VCH, New York.

Shi, X.S., Collins, F.G., Zhao, X.L. (2012). *Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash*

*geopolymeric recycled concrete*, J. Hazard. Mater. 237-238, 20-29.

Suarnita, I.W., dan Rupang, Nicodemus. (2009). *Analisis Kuat Tekan Beton Ringan Tempurung Kelapa*. Palu. Jurnal SMARTek, 7, 143-151

Sugiyarto, K.H. (1996). *Kimia Anorganik Dasar*. Yogyakarta: UGM Press.

Supriadi, W. (2017). *Amobilisasi Kation-kation Logam Berat Menggunakan Geopolimer Dari Abu Layang*, Disertasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Syukri, S. (1999). *Kimia Dasar 1. ITB*, Bandung.

Tennakon, C., Sagoe-Crentsil, K., Nicolas, R.S., dan Sanjayan, J. (2015). *Charateristic of Australian Brown Coal Fly Ash Blended Geopolymers*. Construction and Building Materials, 101, 396-409.  
doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.089

Thomas, M. D. A., B. Fournier, K. J. Ideker and Y. Resendez. (2007). *The Use of Lithium To Prevent or Mitigate AlkaliSilica Reaction in Concrete Pavements and Structures*. Report No. FHWA-HRT-06-133 McLean, USA: Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration

Tjokrodimuljo, K. (1996). *Teknologi Beton*. Percetakan Naviri, Yogyakarta.

Torgal,Pacheo, Fernando, Joao Castro-Gomes, and Said Jalali. (2008). *Alkali-activated binders: A review. Part 2*.

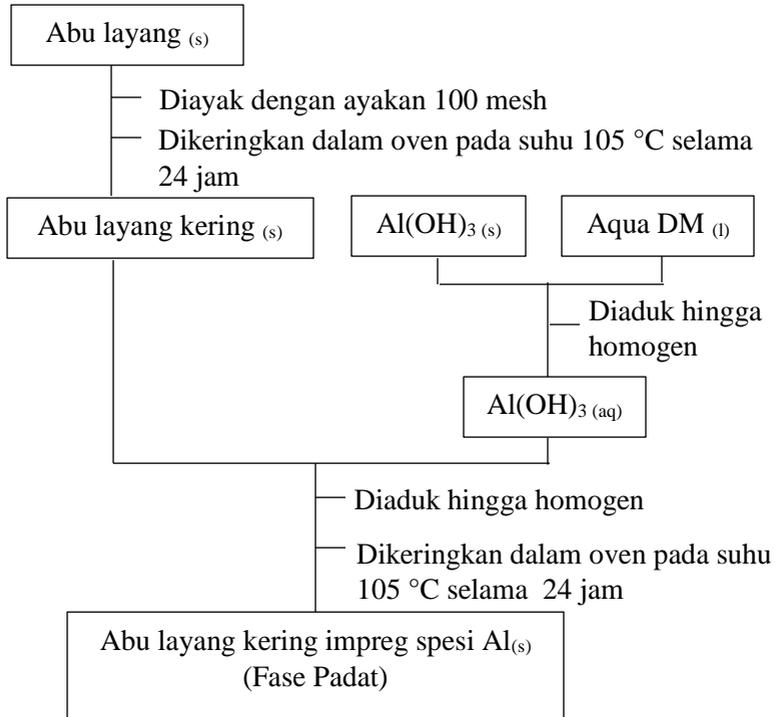
*About materials and binders manufacture.*  
Construction and Building Materials, 22, 1315-1322.

- Wang, Tiao, Ishida, Tetsuya. (2019). *Multiphase Pozzolanic Reaction Model of Low Calcium Fly Ash in Cement System.* Cement and Concrete Research 122. Tokyo, 274 – 287.
- Wardani, S.P.R. (2008). *Pemanfaatan Limbah Batubara (Fly Ash) untuk Stabilisasi Tanah maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan.* Semarang, Jawa Tengah, Indonesia.
- Wiyono, David, Agie Vianthi, Antoni, and Djwantoro Hardjito. (2012). *Durabilitas Mortar Geopolymer Berbasis Lumpur Sidoarjo.* Jurnal Pratama Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, 1-8.
- Xu, Hua, and J.S.J van Deventer. (2000). *The Geopolymerisation of Alumino-silicate Minerals.* International Journal of Mineral Processing, 247-266

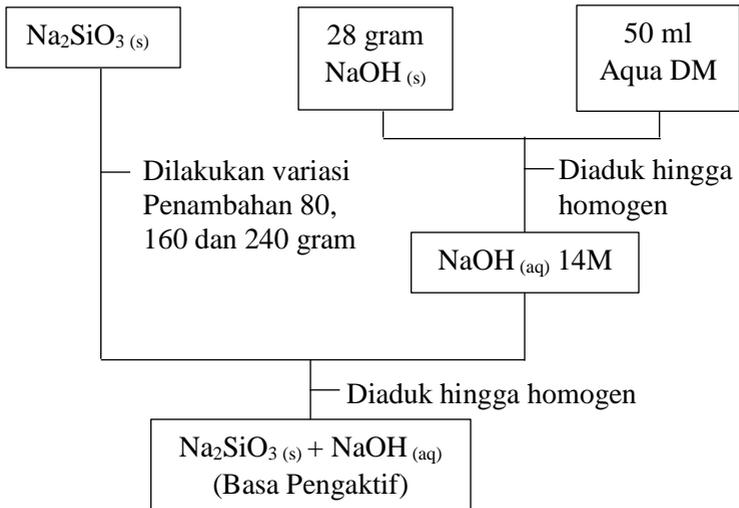
## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Skema kerja

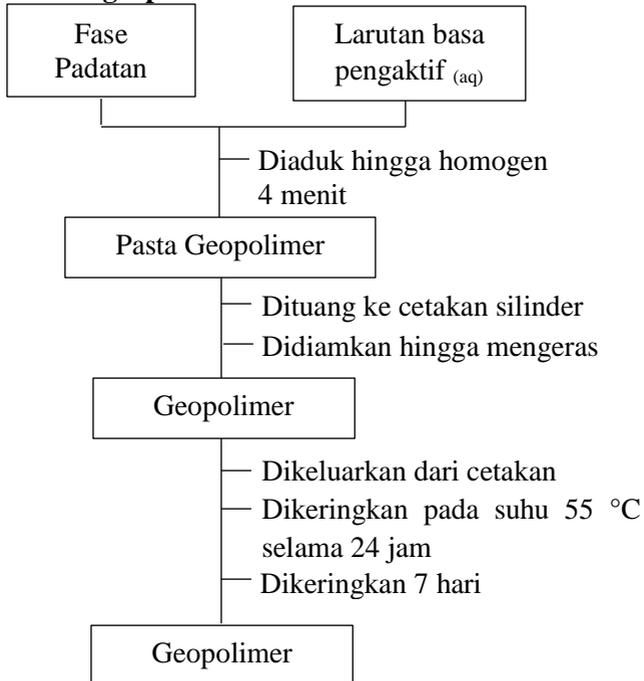
#### 1. Preparasi fase padatan



## 2. Pembuatan basa pengaktif



### 3. Sintesis geopolimer



Lampiran 2  
 Hasil Karakterisasi Abu Layang

1. PSA (Particle Size Analyzer)  
 a. Abu layang PLTU Ketapang



Result Analysis Report

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

SOP Name:  
 Cement OPC  
 Measured by:  
 MALVERN INSTRUMENTS

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

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

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

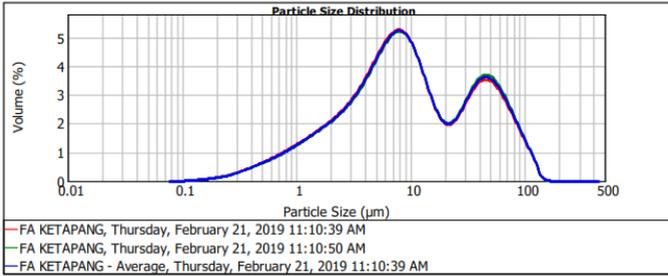
Analysis model:  
 General purpose (fine)  
 Size range:  
 0.020 to 2000.000 um  
 Weighted Residual:  
 0.501 %  
 Sensitivity:  
 Normal  
 Obscuration:  
 3.93 %  
 Result Emulation:  
 On

Concentration:  
 0.0005 %Vol  
 Specific Surface Area:  
 0.477 m<sup>2</sup>/g

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

Uniformity:  
 1.88  
 Result units:  
 Volume  
 Vol. Weighted Mean D[4,3]:  
 20.617 um

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



Size (µm)	Vol Under %										
0.500	2.19	10.000	54.13	53.000	87.60	140.000	99.99	395.000	100.00	800.000	100.00
1.000	6.35	12.181	59.95	55.000	88.84	150.000	99.99	400.000	100.00	1000.000	100.00
1.546	8.78	15.000	64.74	60.000	91.33	160.000	100.00	425.000	100.00	1120.000	100.00
1.487	10.17	20.000	69.25	71.000	93.56	180.000	100.00	450.000	100.00	1180.000	100.00
1.500	10.26	25.000	72.19	75.000	94.50	200.000	100.00	500.000	100.00	1250.000	100.00
1.505	10.30	32.000	76.25	80.000	95.50	212.000	100.00	550.000	100.00	1400.000	100.00
1.716	11.84	35.000	78.95	90.000	97.05	224.000	100.00	600.000	100.00	1500.000	100.00
2.000	13.62	38.000	79.84	100.000	98.18	250.000	100.00	650.000	100.00	1700.000	100.00
2.500	17.08	40.000	81.00	105.000	98.68	280.000	100.00	710.000	100.00	1800.000	100.00
3.000	20.18	45.000	83.75	112.000	99.08	300.000	100.00	800.000	100.00	2000.000	100.00
5.000	31.70	50.000	86.25	125.000	99.71	315.000	100.00	850.000	100.00		

b. Abu layang PLTU Sanggau



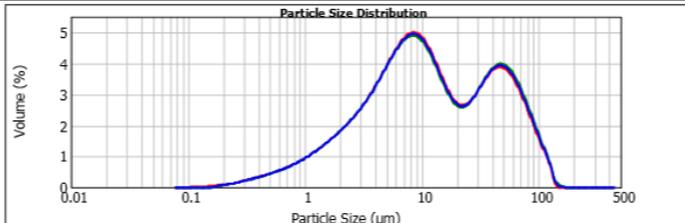
Result Analysis Report

**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 RI:** 1.860  
**Dispersant Name:**  
**Concentration:** 0.0007 %Vol  
**Specific Surface Area:** 0.38 m<sup>2</sup>/g  
**Accessory Name:** Scirocco 2000  
**Absorption:**  
**Dispersant RI:** 1.000  
**Span :** 5.715  
**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 4.328  $\mu$ m  
**Analysis model:** General purpose (fine)  
**Size range:** 0.020 to 2000.000  $\mu$ m  
**Weighted Residual:** 0.394 %  
**Sensitivity:** Normal  
**Obscuration:** 4.18 %  
**Result Emulation:** On

**Uniformity:** 1.69  
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 22.826  $\mu$ m  
**Result units:** Volume

**d(0.1): 1.901  $\mu$ m**      **d(0.5): 10.629  $\mu$ m**      **d(0.9): 62.643  $\mu$ 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)	Wt Under %								
0.500	1.47	10.000	48.11	53.000	85.98	140.000	98.97	500.000	100.00
1.000	4.47	12.181	53.99	56.000	87.33	150.000	100.00	600.000	100.00
1.046	4.76	15.000	59.27	63.000	93.13	160.000	100.00	625.000	100.00
1.467	7.48	20.000	64.82	71.000	95.89	180.000	100.00	650.000	100.00
1.500	7.56	25.000	66.76	75.000	95.75	200.000	100.00	500.000	100.00
1.505	7.59	32.000	73.05	80.000	94.89	212.000	100.00	560.000	100.00
1.716	8.98	36.000	76.21	90.000	96.89	224.000	100.00	600.000	100.00
2.000	10.59	38.000	77.50	100.000	97.97	250.000	100.00	600.000	100.00
2.500	13.21	40.000	78.76	105.000	98.54	280.000	100.00	710.000	100.00
3.000	16.33	45.000	81.76	112.000	98.00	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

c. Abu layang PLTU Wilmar



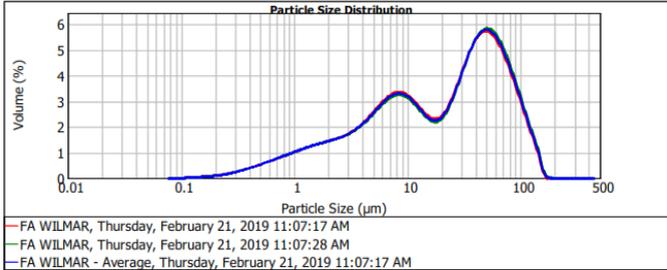
MASTERSIZER



Result Analysis Report

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

d(0.1): 1.811  $\mu\text{m}$                       d(0.5): 22.942  $\mu\text{m}$                       d(0.9): 81.712  $\mu\text{m}$



Size $\mu\text{m}$	Vol Under %										
0.500	1.78	10.000	36.00	50.000	73.46	140.000	99.41	300.000	100.00	600.000	100.00
1.000	5.28	12.181	39.91	56.000	77.46	150.000	99.84	400.000	100.00	1000.000	100.00
1.040	5.59	15.000	43.44	63.000	81.74	160.000	99.98	425.000	100.00	1130.000	100.00
1.487	8.38	20.000	47.74	71.000	85.79	180.000	100.00	450.000	100.00	1180.000	100.00
1.900	8.35	25.000	51.04	75.000	87.21	200.000	100.00	500.000	100.00	1250.000	100.00
1.905	8.38	32.000	57.67	80.000	89.41	212.000	100.00	500.000	100.00	1400.000	100.00
1.716	9.52	36.000	61.31	90.000	92.20	224.000	100.00	600.000	100.00	1600.000	100.00
2.000	10.92	38.000	63.12	100.000	94.82	250.000	100.00	630.000	100.00	1700.000	100.00
2.500	13.11	40.000	64.91	100.000	95.98	280.000	100.00	710.000	100.00	1800.000	100.00
3.000	15.07	45.000	69.21	112.000	96.85	300.000	100.00	800.000	100.00	2000.000	100.00
5.000	22.02	50.000	73.19	125.000	98.33	315.000	100.00	850.000	100.00		

*Lampiran 3***Perhitungan Kuat Tekan**

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

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

$$P = \frac{m \cdot a}{A}$$

P = Kuat tekan (MPa)

F = Gaya tekan yang dapat ditahan geopolimer (kN)

A = luas penampang geopolimer (m<sup>2</sup>)

m = massa geopolimer (kg)

a = percepatan gravitasi (9,806 m<sup>2</sup>/s)

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

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

$$\pi = 3,14$$

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

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

Konversi dari kN/m<sup>2</sup> ke MPa adalah sebagai berikut:

$$0,001 \text{ MPa} = 1 \text{ kN/m}^2$$

$$10 \text{ MPa} = 1 \text{ kN/cm}^2$$

Data hasil uji kuat tekan dalam kN

Pengulangan sampel ke-	PT. Wilmar		PLTU Ketapang		PLTU Sanggau	
	32%	41%	32%	41%	32%	41%
1	3	1	10	6	4	2
2	3	1	9	4	3	2
3	2	2	5	5	4	2
4	3	1	6	2	4	3
5	3	2	4	7	4	3

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{F}{A} \\
 &= \frac{2 \text{ kN}}{3,14 \times 1 \text{ cm}^2} \\
 &= 0,637 \text{ kN/cm}^2 \\
 &= 6,37 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Dengan cara perhitungan di atas, didapatkan hasil kuat tekan dari geopolimer dalam satuan MPa

Pengulangan sampel ke-	PT. Wilmar		PLTU Ketapang		PLTU Sanggau	
	32%	41%	32%	41%	32%	41%
1	9.54	3.18	31.80	19.08	12.72	6.36
2	9.54	3.18	28.62	12.72	9.54	6.36
3	6.36	6.36	15.90	15.90	12.72	6.36
4	9.54	3.18	19.08	6.36	12.72	9.54
5	9.54	6.36	12.72	22.26	12.72	9.54
rata-rata	8.90	4.45	21.62	15.26	12.08	7.63
std. deviasi	1.42	1.74	8.23	6.12	1.42	1.74

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap **DADANG**, dilahirkan di Tuban, 23 Mei 1997 merupakan memiliki 3 saudara kandung dan 3 saudara angkat. Penulis merupakan salah satu alumni dari SMAN 1 Tuban. Diterima di Kimia FSAINS ITS lewat jalur SBMPTN dengan NRP **0121154000071**. Selama kuliah, penulis aktif dalam organisasi kemahasiswaan yaitu Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMKA) ITS sebagai *staff* Dalam Negeri periode 2016/2017 dan menjadi Ketua Himpunan di periode 2017/2018. Penulis juga aktif dalam ormawa institut sebagai Staff Magang Kebijakan Kampus BEM ITS Periode 2015/2016, staff Advokasi Kesejahteraan Mahasiswa BEM ITS pada periode 2016/2017 dan menjadi Sekretaris Jendral BEM ITS dan Pelaksana tugas Menteri Kementerian Dalam Negeri pada periode 2019. Penulis aktif mengikuti pelatihan LKMM PraTD 2015, LKMM TD 2016, LKMM TM 2017 dan LKMM TL NASIONAL ITS 2017. Penulis juga pernah menjadi panitia dalam acara olimpiade nasional Chemistry Week 8 dan Chemistry Week 9 sebagai sie perlengkapan. ITS EXPO 2016 sebagai staff konsep kreatif dan ITS EXPO 2017 sebagai wakil coordinator sie konsep kreatif. Penulis mengambil bidang minat Geopolimer sebagai penelitian Tugas Akhir di bawah bimbingan Bapak Prof. Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D dalam Laboratorium Kimia Material dan Energi kritik dan saran dapat disampaikan kepada penulis melalui email [dadang15.chem.its@gmail.com](mailto:dadang15.chem.its@gmail.com) .