



**PENGARUH PENAMBAHAN PATI KETELA POHON  
(*Manihot esculenta*) TERHADAP SIFAT FISIK DAN KIMIA  
GEOPOLIMER ABU LAYANG BATU BARA**

Skripsi

disusun sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Sarjana Sains  
Program Studi Kimia

oleh

Aliysha Rahma Maulidina  
4311415054

**JURUSAN KIMIA FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU  
PENGETAHUAN ALAM**

**UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

**2020**

## **PERSETUJUAN PEMBIMBING**

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke Sidang Panitia Ujian Skripsi Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Hari : Jumat

Tanggal : 3 Januari 2020

Semarang, 3 Januari 2020

Pembimbing

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized letter 'E' followed by several vertical and diagonal strokes, all enclosed within a large, irregular oval shape.

Ella Kusumastuti, S.Si., M.Si

NIP. 198212142009122004

## PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, 3 Januari 2020



Aliysha Rahma Maulidina

## PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul *Pengaruh Penambahan Pati Ketela Pohon (Manihot esculenta) terhadap Sifat Fisik dan Kimia Geopolimer Abu Layang Batu Bara* Karya Aliysha Rahma Maulidina 4311415054 ini telah dipertahankan dalam Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada tanggal 3 Januari 2020 dan disahkan oleh panitia ujian.

Semarang, 3 Januari 2020

### Panitia



Dr. Sugianto, M.Si

NIP.196102191993031001

Sekretaris,



Dr. Sigit Priatmoko, M.Si

NIP.196504291991031001

Penguji I,



Dr. Triastuti Sulistyaningsih, M.Si

NIP.197704112005012014

Penguji II,



Endah Fitriani Rahayu, S.Si., M.Sc

NIP.198705202014042002

Penguji III/Pembimbing



Ella Kusumastuti, S.Si., M.Si

NIP. 198212142009122004

## **MOTTO DAN PERSEMBAHAN**

### **Motto**

“Start where you are. Use what you have. Do what you can”

“It always seems impossible until it’s done” (Nelson Mandela)

### **Persembahan**

1. Ayah, Ibu, Mba, Adek dan keluarga terimakasih untuk kepercayaan yang telah diberikan.
2. Teman –Teman (Muara, Halim, Mei, Taufiq) terima kasih untuk motivasi dan bantuan.
3. Annisa Rizqi Amalia dan Rizki Widayati yang telah memberi dorongan dan motivasi.
4. Teman berbagi Uswatun, Resti, dan Ghozali terimakasih untuk saling menguatkan.
5. Teman-teman KKN Desa Carikan 2018 dan Kimia angkatan 2015.

## PRAKATA

Puji syukur Kehadirat Allah SWT, berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Penambahan Pati Ketela Pohon (*Manihot esculenta*) Terhadap Sifat Fisik dan Kimia Geopolimer Abu Layang Batu Bara” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Program Studi Kimia.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Pada kesempatan kali ini, saya mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunan skripsi ini, terutama kepada :

1. Dekan FMIPA Universitas Negeri Semarang.
2. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang.
3. Ella Kusumastuti, S.Si., M.Si selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan, ilmu, bantuan, dan motivasi yang membangun.
4. Dr.Triastuti Sulistyaningsih, M.Si dan Endah Fitriani Rahayu, S.Si., M.Sc selaku dosen penguji yang telah memberikan dukungan dan masukannya.
5. Semua pihak yang telah memberikan doa, motivasi, bantuan, dan saran dalam penelitian dan penyusunan skripsi.

Saya menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Semoga skripsi ini tidak hanya bermanfaat bagi penulis, namun juga pada semua pembaca.

Semarang, Januari 2020

Penulis

## ABSTRAK

Maulidina, Aliysha Rahma. 2020. *Pengaruh Penambahan Pati Ketela Pohon (Manihot esculenta) Terhadap Sifat Fisik dan Kimia Geopolimer Abu Layang Batubara*. Skripsi, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Utama Ella Kusumastuti, S.Si., M.Si

Kata Kunci : geopolimer, abu layang, pati ketela pohon.

Geopolimer merupakan salah satu inovasi dalam mengembangkan material konstruksi yang ramah lingkungan. Geopolimer sebagai bahan bangunan memiliki sifat kekuatan tarik rendah dan sensitif retak yang disebabkan oleh waktu pengerasan awal yang relatif singkat. Salah satu cara untuk meningkatkan nilai kuat tarik geopolimer adalah penambahan pati ketela pohon sebagai *stabilizing agent*, dimana amilopektin yang terkandung dalam pati memiliki sifat granuler yang mengembang dan daya pengikat yang baik. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan pati ketela pohon terhadap karakteristik geopolimer. Sintesis dilakukan dengan mencampurkan larutan pengaktif (NaOH, H<sub>2</sub>O dan natrium silikat) dan abu layang dan dilanjutkan dengan penambahan gel pati ketela pohon variasi antara 0-3% (b/b) abu layang (interval 0,5). Geopolimer hasil sintesis diselidiki karakteristiknya antara lain viskositas, konsistensi dan laju alir, waktu pengerasan, kuat tekan dan kuat tarik, ketahanan terhadap serangan sulfat, kapasitas netralisasi asam, gugus fungsi, fasa mineral dan morfologinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan pati ketela pohon pada pasta meningkatkan nilai viskositas, konsistensi, laju alir dan waktu pengerasan, serta meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat tarik, namun menurunkan ketahanan geopolimer terhadap serangan sulfat. Persentase pati ketela pohon (b/b) yang ditambahkan guna menghasilkan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah tertinggi diperoleh pada penambahan 1% pati (b/b) menghasilkan kuat tekan 32,966 MPa dan kuat tarik 2,491 MPa. Secara umum, geopolimer dengan penambahan pati memiliki kuat tekan yang lebih besar, ketahanan terhadap serangan sulfat dan kapasitas netralisasi yang lebih baik bila dibandingkan dengan geopolimer tanpa penambahan pati. Hasil analisis FTIR menunjukkan geopolimer dengan penambahan pati 1 dan 3% muncul pita serapan pada 2630,5 dan 2638,75 cm<sup>-1</sup> yang menunjukkan ikatan C-H amilopektin selain munculnya pita serapan vibrasi Si-O-Si dan Si-O-Al. Hasil analisis XRD menunjukkan sampel dengan penambahan 1% pati ketela pohon (b/b) memiliki fasa amorf ditandai adanya gundukan (*hump*) pada 2 $\theta$  sekitar 15- 40° dengan kandungan mineral utama *quartz*. Analisis morfologi partikel menggunakan SEM menunjukkan bahwa matriks geopolimer dengan penambahan 1% pati lebih homogen, memiliki lebih sedikit *crack* dan sedikit material tak bereaksi.

## ABSTRACT

Maulidina, Aliysha Rahma. 2020. *Effects of Cassava (Manihot esculenta) Starch Addition on Physicochemical Properties of Fly Ash Geopolymer*. Thesis, Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Negeri Semarang. Thesis Supervisor Ella Kusumastuti, S.Si., M.Si

Keyword : geopolymer, cassava starch, fly ash

Geopolymer is one of the innovations in developing environmentally friendly construction materials. Geopolymers as building materials have low tensile strength and crack sensitivity due to the relatively short initial setting time. One way to increase the tensile strength of geopolymers is the addition of cassava starch as a stabilizing agent, where the amylopectin contained in starch has a developing granular properties and good binding power. The purpose of this study was to determine the effect of cassava starch addition to geopolymer characteristics. Synthesis was carried out by mixing the activating solution (NaOH, H<sub>2</sub>O and sodium silicate) and fly ash and continued with the addition of cassava starch gel variations between 0-3% (w/w) fly ash (interval 0,5). The characteristics of the synthesized geopolymer were investigated including viscosity, consistency and flow rate, setting time, compressive strength and tensile strength, resistance to sulfate attack, acid neutralization capacity, functional groups, mineral phase and morphology. The results showed that the addition of cassava starch to the paste increased the value of viscosity, consistency, flow rate and setting time, as well as increasing compressive strength and tensile strength, but decreased resistance to sulfate attack. The percentage of cassava starch (w/w) added to produce the highest compressive strength and tensile strength values was obtained at the addition of 1% starch (w/w) resulting in a compressive strength of 32,97 MPa and tensile strength of 2,49 MPa. In general, geopolymers with the addition of starch have greater compressive strength, resistance to sulfate attack and better neutralization capacity when compared to geopolymers without the addition of starch. FTIR analysis results show geopolymers with the addition of starch 1 and 3% appear absorption bands at 2630,5 and 2638,75 cm<sup>-1</sup> which shows C-H amylopectin bonds in addition to the emergence of Si-O-Si and Si-O-Al vibration absorption bands. The results of XRD analysis showed that samples with the addition of 1% starch of cassava (w/w) had an amorphous phase characterized by humps at 2θ about 15-40° with the main mineral content of quartz. Particle morphological analysis using SEM shows that the geopolymer matrix with the addition of 1% starch is more homogeneous, has less crack and less unreacted material.



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
PERNYATAAN.....	ii
PENGESAHAN .....	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN .....	iv
PRAKATA.....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I_PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Rumusan Masalah .....	5
1.3    Tujuan Penelitian.....	5
1.4    Manfaat Penelitian.....	5
BAB II_TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1    Abu Layang Batu Bara .....	7
2.2    Geopolimer .....	8
2.3    Sintesis Geopolimer .....	10

2.4	Pati Ketela Pohon ( <i>Manihot esculenta</i> ).....	14
2.5	Karakterisasi Geopolimer.....	17
2.5.1	Penentuan Viskositas Pasta Geopolimer.....	17
2.5.2	Penentuan Waktu Pengerasan.....	17
2.5.3	Penentuan Konsistensi Pasta Geopolimer.....	18
2.5.4	Penentuan Kuat Tekan.....	19
2.5.5	Penentuan Kuat Tarik.....	20
2.5.6	Ketahanan terhadap Serangan Sulfat.....	21
2.5.7	Kapasitas Netralisasi Asam (KNA).....	21
2.5.8	Analisis Ikatan Kimia dengan FTIR.....	22
2.5.9	Analisis Fasa Mineral Dengan XRD ( <i>X-Ray Diffraction</i> ).....	22
2.5.10	Analisis Morfologi Partikel Menggunakan SEM.....	23
BAB III METODE PENELITIAN.....		25
3.1	Lokasi Penelitian.....	25
3.2	Sampel.....	25
3.3	Variabel Penelitian.....	25
a.	Variabel Bebas.....	25
b.	Variabel Terikat.....	26
c.	Variabel terkendali.....	26
3.4	Alat dan Bahan.....	26
3.5	Prosedur Penelitian.....	27
3.5.1	Preparasi Pati Ketela Pohon.....	27
3.5.2	Preparasi Abu Layang.....	27
3.5.3	Pembuatan Larutan Alkali.....	27
3.5.4	Sintesis Geopolimer dengan Variasi Pati Ketela Pohon.....	27

3.6	Karakterisasi Geopolimer.....	28
3.6.1	Uji Viskositas.....	28
3.6.2	Uji Konsistensi dan Laju Alir Pasta Geopolimer.....	28
3.6.3	Uji Waktu Pengerasan .....	29
3.6.4	Uji Kuat Tekan.....	29
3.6.5	Uji Kuat Tarik Belah.....	29
3.6.6	Uji Ketahanan terhadap Serangan Sulfat .....	30
3.6.7	Kapasitas Netralisasi Asam (KNA) .....	30
3.6.8	Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR ( <i>Fourier Transform Infrared</i> ) .	30
3.6.9	Analisis Fasa Mineral dengan XRD ( <i>X-Ray Diffraction</i> ).....	31
3.6.10	Analisis Morfologi dengan SEM ( <i>Scanning Electron Microscopy</i> )...	31
BAB IV_HASIL DAN PEMBAHASAN .....		32
4.1	Preparasi .....	32
4.1.1	Preparasi dan Karakterisasi Bahan Awal.....	32
4.1.2	Preparasi Pati Ketela Pohon.....	36
4.2	Sintesis Geopolimer dengan Penambahan Pati Ketela Pohon.....	37
4.3	Karakterisasi Geopolimer .....	38
4.3.1	Viskositas, Konsistensi dan Laju Alir.....	38
4.3.2	Waktu Pengerasan.....	41
4.3.3	Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Geopolimer .....	42
4.3.4	Ketahanan Geopolimer Terhadap Serangan Sulfat.....	45
4.3.5	Kapasitas Netralisasi Asam .....	47
4.3.6	Karakterisasi FTIR ( <i>Fourier Transform Infrared</i> ) .....	48
4.3.7	Karakterisasi XRD ( <i>X-Ray Diffraction</i> ) .....	51
4.3.8	Karakterisasi SEM ( <i>Scanning Electron Microscopy</i> ).....	52

BAB V_PENUTUP.....	55
5.1    Simpulan.....	55
5.2    Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA .....	57
LAMPIRAN.....	66

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Jenis - Jenis Polysialate .....	9
Gambar 2.2. Granula Pati Singkong .....	15
Gambar 2.3. Struktur Amilosa .....	15
Gambar 2.4. Struktur Amilopektin.....	15
Gambar 2.5. Alat Jarum Vicat .....	18
Gambar 2.6. Penentuan Konsistensi Pasta Geopolimer .....	19
Gambar 2.7. Mikrograf SEM ( <i>Scanning Electron Microscopy</i> ) Geopolimer Abu Layang Batu Bara .....	24
Gambar 4. 1. Abu Layang Batu Bara Tanjungjati Jepara Sebelum di Preparasi (a) dan Setelah di Preparasi (b).....	32
Gambar 4. 2. Difraktogram Abu Layang PLTU Tanjungjati Jepara (Q = <i>Quartz</i> , M = <i>Mullite</i> , Ma = <i>Maghemite</i> ).....	34
Gambar 4. 3. Spektrum FTIR Abu Layang PLTU Tanjungjati Jepara .....	35
Gambar 4. 4. Pati Ketela Pohon .....	36
Gambar 4. 5. Hasil Sintesis Geopolimer penambahan 1% Pati Ketela Pohon (a) Sampel uji geopolimer penampang diameter, (b) Sampel uji geopolimer penampang panjang diambil pada sampel utuh.....	37
Gambar 4. 6. Hasil Sintesis Geopolimer Penambahan Pati Ketela Pohon diambil pada keadaan sampel uji belah (a) 0%, (b) 0,5%, (c) 1%, (d) 1,5%, (e) 2%, (f) 2,5% dan (g) 3% penambahan pati....	37
Gambar 4. 7. Pembentukan Ikatan Hidrogen pada Antarmuka Amilopektin- Geopolimer .....	38
Gambar 4. 8. Hubungan Waktu Alir dan Viskositas.....	40
Gambar 4. 9. Grafik Waktu Pengerasan Geopolimer dengan Penambahan Pati Ketela Pohon .....	42
Gambar 4. 10. Diagram Kuat Tekan dan Kuat Tarik Geopolimer-Pati Ketela Pohon.....	43
Gambar 4. 11. Hasil Sampel Geopolimer setelah dilakukan perendaman.....	45
Gambar 4. 12. Hasil Pengukuran Berat dan Penurunan Kuat Tekan setelah Perendaman. ....	46
Gambar 4. 13. Spektra FTIR Abu Layang, Pati Ketela Pohon, Geopolimer 0; 1; dan 3% Penambahan Pati Ketela Pohon.....	49

Gambar 4. 14. Difraktogram abu layang, geopolimer dengan sampel 0; 1; dan 3% Penambahan Pati Ketela Pohon, (Q) quartz ( $\text{SiO}_2$ ); (K) kaolinite ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$ ), (G) Gibbsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), (S) sodalite ( $\text{Al}_6\text{Na}(\text{SiO}_4)(\text{Cl}_2)$ ), dan (M) mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ).....	51
Gambar 4. 15. Hasil Analisis SEM .....	53

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Komposisi Kimia Abu Layang Batu Bara PLTU Tanjungjati Jepara...	7
Tabel 2. 2. Pita-Pita Vibrasi Karakteristik Geopolimer .....	22
Tabel 3. 1. Variasi Geopolimer dengan Penambahan Pati Ketela Pohon .....	28
Tabel 4. 1. Komposisi Kimia Abu Layang PLTU Tanjungjati Jepara dengan XRF .....	33
Tabel 4. 2. Kandungan Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) Teknis dengan XRF .....	36
Tabel 4. 3. Hasil Perhitungan Konsistensi Variasi Penambahan Pati Ketela Pohon.....	39
Tabel 4. 4. Hasil Analisis Kuat Tekan Geopolimer dengan Penambahan Pati Ketela Pohon .....	43
Tabel 4. 5. Data pengukuran pH $\text{MgSO}_4$ awal, pH $\text{MgSO}_4$ akhir, KNA dan KNA rata-rata Geopolimer.....	48
Tabel 4. 6. Hasil Analisis FTIR Geopolimer .....	50

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Skema Kerja Penelitian .....	66
Lampiran 2. Perhitungan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dari Abu Layang.....	70
Lampiran 3. Perhitungan Rasio Mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ Berasal dari Abu Layang dan Natrium Silikat.....	70
Lampiran 4. Perhitungan Berat Pati Ketela Pohon dalam Prosentase Solid Geopolimer .....	70
Lampiran 5. Perhitungan Standarisasi NaOH Teknis dengan Asam Oksalat .....	71
Lampiran 6. Analisis Kadar Amilopektin Pati Ketela Pohon .....	72
Lampiran 7. Hasil Viskositas dan Waktu Alir Sampel Geopolimer .....	73
Lampiran 8. Hasil Nilai Kuat Tekan dan Kuat Tarik.....	73
Lampiran 9. Tabel Analisis Waktu Pengerasan Geopolimer .....	74
Lampiran 10. Kuat Tekan Sebelum dan Sesudah Perendaman dengan Magnesium Sulfat 10% .....	74
Lampiran 11. Kartu PDF (Powder Diffraction File) untuk penentuan jenis mineral dengan XRD (X-Ray Diffraction) .....	75
Lampiran 12. Dokumentasi .....	79



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Produksi semen menghasilkan emisi gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) di udara yang berpengaruh pada perubahan iklim. Besarnya emisi yang dikeluarkan oleh industri semen disebabkan oleh tingginya produksi dan permintaan semen di seluruh dunia yang diprediksikan akan terus meningkat (Hasanbeigi *et al.*, 2012). Walmiki dan Pambudi (2013) melaporkan bahwa CO<sub>2</sub> berkontribusi dalam menaikkan emisi gas rumah kaca sebanyak 65%. Dari jumlah tersebut, sekitar 8% berasal dari industri semen, yang didominasi oleh produk *Ordinary Portland Cement* (OPC) (Quere *et al.*, 2016). Menurut Quere *et al.*, (2016) produksi keseluruhan Semen Portland di dunia memberikan kontribusi 2,2 miliar ton CO<sub>2</sub> atau sekitar 10% dari pelepasan CO<sub>2</sub> ke atmosfer. Guna mengatasi permasalahan tersebut, dibutuhkan solusi yang tepat agar didapatkan bahan pengganti sehingga pembangunan dapat terekonstruksi dengan baik namun tetap meminimalisir dampak negatif CO<sub>2</sub>. Geopolimer merupakan salah satu solusi yang dapat ditawarkan untuk mengatasi permasalahan tersebut.

Geopolimer adalah suatu polimer anorganik yang mulai dikembangkan sebagai alternatif pengganti beton dalam bahan bangunan. Geopolimer merupakan campuran yang dibuat oleh reaksi geosintesis dari bahan jenis aluminosilikat dengan larutan alkali pada suhu rendah (<100°C) (Caicedo & Gutiérrez, 2015). Hilman (2010) menyebutkan bahwa alur produksi geopolimer tidak memerlukan pengolahan pada temperatur tinggi sehingga bahan ini memiliki residu karbon yang relatif lebih rendah daripada produksi semen portland. Selain itu, geopolimer disebut ramah lingkungan dengan menggunakan bahan-bahan buangan industri. Proses pembuatan geopolimer tidak memerlukan energi, seperti pada proses pembuatan semen yang memerlukan suhu hingga 800°C. Karenanya, pembuatan geopolimer mampu menurunkan emisi gas rumah kaca yang diakibatkan oleh proses produksi semen hingga tinggal 20 persen (Hardjito, 2004)

Geopolimer selain menyediakan kinerja yang sebanding dengan semen portland dalam banyak aplikasi, juga memiliki keuntungan lainnya seperti kuat tekan tinggi, waktu pengerasan cepat, dengan ketahanan termal yang baik, ketahanan terhadap asam dan secara signifikan mengurangi penggunaan energi serta emisi gas rumah kaca (Hidayat, 2009). Disamping itu, geopolimer juga dapat digunakan dalam proses solidifikasi/stabilisasi (S/S) dari limbah beracun dan radioaktif (Nikolic *et al.*, 2014). Ketahanan terhadap asam dan daya tahan yang ada pada geopolimer menjadikannya sebagai solusi yang ideal untuk *landfill* berbasis metode immobilisasi (Deventer *et al.*, 2007). Elyamany *et al.*, (2018) meneliti ketahanan geopolimer berbasis *fly ash* terhadap serangan magnesium sulfat. Geopolimer direndam larutan magnesium sulfat 10% selama 48 minggu dan didapatkan hasil penurunan kuat tekan sebesar 33% dan kuat tarik 35%, hasil ini lebih rendah dibandingkan dengan semen portland dengan penurunan kuat tekan sebesar 40% dan kuat tarik 38%. Selain itu, dari segi bentuk geopolimer tidak menunjukkan perubahan bentuk atau retakan pada, sebaliknya pada semen portland menunjukkan keretakan pada permukaannya.

Geopolimer dapat disintesis dari bahan dasar yang memiliki silika-alumina tinggi yang mudah ditemukan di alam, seperti lempung, produk (bahan buangan industri) seperti abu layang (*fly ash*), abu sekam padi, dan *furnace slag* (San *et al.*, 2016). Dari bahan tersebut yang mudah ditemui dan ketersediaannya melimpah adalah abu layang batu bara. Komponen utama abu layang batubara yang berasal dari pembangkit listrik adalah silika ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dan besi oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sisanya adalah karbon, kalsium, magnesium, dan belerang. Sifat kimia abu layang batubara dipengaruhi oleh jenis batubara yang dibakar dan teknik penyimpanan serta penanganannya (Kong *et al.*, 2007). Menurut ASTM C618, (1995) abu layang (*fly ash*) didefinisikan sebagai butiran halus hasil residu pembakaran batubara. *Fly ash* dianggap menguntungkan karena reaktivitas partikelnya lebih halus daripada slag. Selain itu, *fly ash* yang mengandung kalsium rendah lebih diharapkan dibandingkan slag yang digunakan sebagai bahan baku, dimana pada reaksi polimerasi, kadar kalsium yang tinggi dapat mempengaruhi bentuk mikrostrukturnya (Arini *et al.*, 2013).

Selain keunggulannya, geopolimer memiliki sifat getas dengan kekuatan tarik yang rendah dan sensitif retak (Ekaputri, 2013). Hal tersebut dapat menjadi kendala dalam desain struktural dan mempengaruhi daya tahan jangka panjang struktur. Pada saat ini dibutuhkan beton berkekuatan tinggi dan tahan lama, sehubungan dengan itu nilai ekonomi juga perlu diperhatikan dalam pemilihan bahan dan produk. Baru-baru ini upaya penelitian dilakukan dengan berkonsentrasi pada variasi pencampuran pada pasta dengan tujuan meningkatkan sifat beton dengan kuat tekan tinggi dan waktu pengerasan yang tertentu.

Upaya peningkatan mutu beton terus dilakukan, seperti penambahan material *stabilising agent* sebagai pengatur waktu pengerasan, dimana pada geopolimer umumnya dengan tingkat waktu pengerasan cepat yang dikhawatirkan menghasilkan kualitas geopolimer dengan banyak pori sehingga rawan retak. Guna meningkatkan stabilitas dan mengurangi *bleeding* (campuran air yang naik pada permukaan beton), seringkali ditambahkan zat penstabil polimer dalam campurannya. Salah satu campuran tersebut adalah polisakarida berupa pati (Schmidt *et al.*, 2013).

Pati merupakan salah satu sumber daya polimer melimpah di dunia. Pati dan turunannya diketahui menunjukkan karakteristik pengubah viskositas. Kelebihan utama pati adalah dapat diaplikasikan di industri karena murah dan ramah lingkungan. Penelitian semen dengan penambahan pati telah dilakukan, namun pada geopolimer belum pernah dilakukan. Dipilihnya pati sebagai bahan tambahan karena pati memiliki kadar amilopektin tinggi, kekuatan perekat yang tinggi, dan kedap air (Ji *et al.*, 2013).

Izaguirre *et al.*, (2010) melakukan pengujian efek pati kentang dapat meningkatkan viskositas mortar berbahan dasar kapur dan polimer karbohidrat. Semakin tinggi viskositas yang dihasilkan maka semakin tinggi pula kuat tekan mortar beton yang didapat. Penambahan pati juga dapat memperlambat waktu pengerasan pada beton, dimana hasil tertinggi terjadi pada penambahan pati kentang 0,8% dari berat mortar dengan waktu pengerasan 950 menit.

Pada era Cina kuno, penggunaan pati sebagai zat aditif mortar kapur sudah digunakan secara luas. Mortar tersebut terdiri dari zat aditif anorganik dan zat

aditif organik (Li & Zhang, 2018). Tembok kota, menara, kuil dan berbagai konstruksi di Cina diketahui mengandung pati beras ketan. Bahkan menara, kuil, dan jembatan kuno di Kabupaten Quan yang dibangun di Dinasti Tang atau Song selamat dari gempa berkekuatan 7,5 skala richter pada tahun 1604 (Zeng, 2003). Menurut Yang *et al.*, (2009), penambahan beras ketan pada mortar kapur dapat meningkatkan kekuatan tekan hingga 30 kali, ketangguhan permukaan sebesar 2,5 kali, dan kedap air hingga 80 hari. Penambahan pati dalam bahan mortar dipilih karena memiliki kadar amilopektin tinggi dan mudah ditemukan. Jenis pati lain yang sering di jumpai di masyarakat Indonesia dengan nilai ekonomis dan ketersediaannya melimpah salah satunya adalah pati ketela pohon.

Ketela pohon merupakan sumber karbohidrat dan makanan pokok bagi beberapa daerah di Indonesia dimana produksi ketela di Indonesia mencapai 20,8 juta ton pertahun (Badan Pertanian Indonesia, 2008). Salah satu alternatif pengawetan pada ketela adalah pembuatan pati ketela pohon yang saat ini dimanfaatkan sebagai bahan pangan dan perekat.

Murtiningrum (2012) melakukan karakterisasi pati dari lima kultivar ubi kayu dan didapatkan hasil kadar amilosa pati berkisar antara 12,28% sampai 27,38 % sedangkan kadar amilopektin berkisar antara 72,61% sampai 87,71%. Bentuk granula pati adalah bulat, bulat terpotong, elips dengan ukuran berkisar antara 5–25  $\mu\text{m}$ , suhu gelatinisasi berkisar 65–69°C. Sifat amilosa pengikat air, penstabil emulsi, dan agen pembentuk gel sementara amilopektin memiliki sifat alir dan daya kompresibilitas yang kurang baik, tetapi memiliki sifat granuler yang mengembang dan daya pengikat yang baik. (Izaguirre, 2010)

Akindahunsi *et al.*, (2015) meneliti efek kekuatan dan daya tahan beton menggunakan bahan utama semen portland dengan penambahan pati ketela pohon dengan variasi 0-2,0% dari berat semen portland dengan interval 0,5. Beton yang dihasilkan kemudian disimpan selama 28 hari untuk selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan pati ketela pohon dapat meningkatkan kuat tekan. Pengukuran kuat tekan optimum didapat pada penambahan 1% pati ketela pohon dengan nilai 61,43N/mm<sup>2</sup>. Angka

tersebut lebih tinggi dibanding dengan tanpa penambahan pati ketela pohon dengan kuat tekan sebesar 58,53 MPa.

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka penulis ingin mensintesis geopolimer berbasis abu layang batu bara dengan penambahan pati ketela pohon (*Manihot esculenta*) serta pengaruhnya terhadap sifat fisik dan ketahanan geopolimer pada lingkungan asam. Penambahan pati ketela pohon diharapkan dapat menciptakan sifat unggul dan meningkatkan ketahanan geopolimer pada lingkungan asam.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan dari latar belakang di atas, diperoleh rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh penambahan pati ketela pohon terhadap sifat pasta (viskositas, waktu pengerasan, konsistensi dan laju alir) dan sifat mekanik (kuat tekan dan kuat tarik) serta sifat kimia (ketahanan terhadap asam) geopolimer abu layang batubara?;
2. Bagaimana hasil analisis fasa mineral, gugus fungsi dan morfologi pada sampel geopolimer dengan penambahan pati pada kuat tekan optimum?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh penambahan pati ketela pohon terhadap sifat pasta (viskositas, waktu pengerasan, konsistensi dan laju alir pasta geopolimer) dan sifat mekanik (kuat tekan dan kuat tarik) serta sifat kimia (ketahanan terhadap asam).;
2. Mengetahui hasil analisis fasa mineral, gugus fungsi dan morfologi pada sampel dengan penambahan pati optimum.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Dari penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan kontribusi material geopolimer abu layang batu bara dan pati ketela pohon. Material tersebut diharapkan mempunyai keunggulan, diantaranya viskositas dan konsistensi optimal, waktu pengerasan tertentu, kuat tekan, dan kuat tarik tinggi dan

ketahanan geopolimer di lingkungan asam. Hasil-hasil ini diharapkan menghasilkan geopolimer dengan kualitas unggul sehingga dapat menambah nilai ekonomi abu layang batu bara sebagai limbah padat di PLTU.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Abu Layang Batu Bara

Abu layang (*fly ash*) merupakan hasil samping pembakaran batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan ukuran partikel berkisar antara 0,5 – 100  $\mu\text{m}$  (Molina *et al.*, 2015). *American Standart Test Methode C618* (ASTM, 1995:304) mendefinisikan abu layang (*fly ash*) sebagai butiran halus hasil residu pembakaran batubara atau bubuk batubara.

Komposisi kimia abu layang bervariasi tergantung pada jenis batubara serta proses dan kondisi pembakarannya. Oleh karena itu abu layang yang dihasilkan dari PLTU atau industri tertentu akan berbeda sifat dan kandungan kimianya dengan abu layang yang dihasilkan dari PLTU atau industri yang lain. Abu layang digolongkan dalam dua tipe berdasarkan pada kandungan CaOnya. Abu layang kelas C berasal dari pembakaran batubara *subbituminous* atau *lignit* dengan kandungan CaO tinggi ( $\geq 20\%$  w/w) sedangkan abu layang kelas F berasal dari pembakaran batubara *bituminous* atau *antrasit* dengan kandungan CaO rendah (Kim & Prezzi, 2008).

Sebagai contoh abu layang kelas F yang diteliti oleh Hakim (2017) bahwa komposisi kimia dari abu layang PLTU Tanjungjati Kabupaten Jepara seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Komposisi Kimia Abu Layang Batu Bara PLTU Tanjungjati Jepara (Hakim, 2017)

No.	Komponen	% Berat
1.	SiO <sub>2</sub>	44,94
2.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,10
3.	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,25
4.	CaO	6,64
5.	MgO	4,53
6.	Na <sub>2</sub> O	4,14
7.	SO <sub>3</sub>	1,33
8.	K <sub>2</sub> O	2,23
9.	TiO <sub>2</sub>	1,11

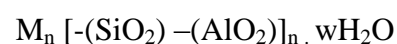
Menurut Hwang (1999), pemanfaatan abu layang sekarang ini masih terbatas pada sektor konstruksi sebagai campuran semen dan beton, namun hanya 20% dari total semen dapat digantikan oleh abu layang. Teknologi pemanfaatan abu layang yang kini dikembangkan antara lain sebagai *filler* dalam pembuatan plastik, pembuatan bahan-bahan *refraktori*, komposit matriks logam, dan sebagai adsorben.

## 2.2 Geopolimer

Geopolimer dikenal sebagai jenis baru polimer anorganik yang disintesis melalui metode aktivasi aluminosilikat dengan larutan alkali pada suhu kurang dari 100°C. Materi ini terdiri dari kerangka Si-O-Al- serupa dengan zeolit tetapi bersifat amorf (Barbosa, 2002; Barbosa, 2003). Geopolimer merupakan produk beton geosintetik dimana reaksi pengikatan yang terjadi adalah reaksi polimerisasi. Dalam reaksi polimerisasi ini alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dan Silika (SiO<sub>2</sub>) mempunyai peranan penting dalam ikatan polimerisasi (Davidovits, 1994).

Kekuatan geopolimer dipengaruhi oleh rasio unsur Si, Na, Al, K, kandungan air. Menurut Hardjito (2004) kesempurnaan polimerisasi hingga membentuk struktur dengan sifat mekanik, kimia atau fisika tertentu, tergantung pada aktivitas dan juga derajat polimerisasinya.

Geopolimer pertama kali diteliti oleh Davidovits (1994) adalah struktur mineral dari piramid. Komposisi kimia material geopolimer mirip dengan zeolit, yakni sama-sama mengandung kerangka Si-O-Al namun pada geopolimer memiliki struktur yang bersifat amorf. Reaksi yang terjadi adalah reaksi eksoterm pada temperatur rendah di bawah 100°C. Davidovits (1994) juga menganjurkan penggunaan istilah *polysialate* untuk geopolimer berbasis silika alumina. Sialat adalah singkatan dari silikon-okso-aluminat (*silico-oxe-aluminate*) dengan rumus sebagai berikut :

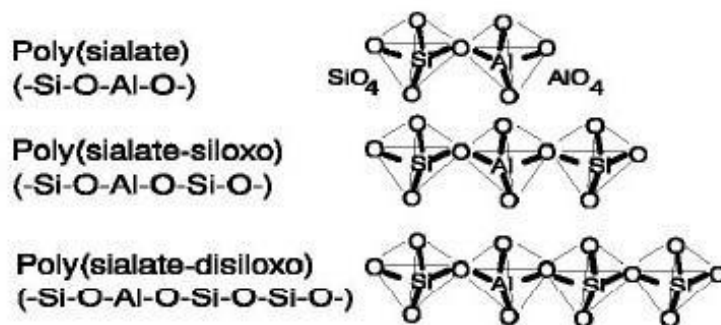


dimana M adalah kation monovalen seperti Na<sup>+</sup> atau K<sup>+</sup>, z = 1, 2, 3, dan n merupakan derajat polimerisasi (Davidovits, 1991). Kekuatan geopolimer dipengaruhi oleh rasio unsur Si, Na, Al, K, dan kandungan air. Menurut Hardjito *et al.*, (2004) kesempurnaan polimerisasi hingga membentuk struktur dengan sifat



mekanik, kimia atau fisika tertentu, bergantung pada aktivitas dan juga derajat polimerisasi.

Davidovits (2008) membedakan tiga tipe *polysialate* yaitu *poly(sialat)* (-Si-O-Al-O-), *poly(sialat-siloxo)* (-Si-O-Al-O-Si-O-), dan *poly(sialat-disiloxo)* (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-). Struktur dari ketiga jenis *polysialate* ini dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur Jenis - Jenis Polysialate (Davidovits, 2008)

Proses sintesis geopolimer menggunakan 2 jenis bahan baku (prekursor) yaitu sumber material dan larutan alkali. Sumber material harus memiliki kandungan utama silika (SiO<sub>2</sub>) dan aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang dapat berasal dari mineral alam seperti kaolin maupun limbah buangan dari industri seperti abu layang, *silica fume*, ampas biji besi (*blast furnace slag*) dan lain-lain. Larutan alkali yang digunakan dalam mengaktivasi prekursor geopolimer berupa *sodium hydroxide* (NaOH), *potassium hydroxide* (KOH), *sodium silicate* (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) dan *potassium silicate* (K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>).

Pada pengembangan proses berwawasan lingkungan, keunggulan geopolimer tidak hanya bertumpu pada konsumsi energi yang lebih rendah daripada OPC, tetapi juga fleksibilitas bahan baku yang sangat tinggi. Proses sintesis geopolimer dapat memanfaatkan padatan aluminosilikat apapun, dari mineral alami, bahan sintetik, hingga limbah anorganik. Xu & van Deventer (2003) menggolongkan bahan-bahan baku aluminosilikat ini sebagai: (1) bahan-bahan terkalsinasi, misalnya metakaolin, abu layang, ampas peleburan logam

(*slag*), dan sebagainya, serta (2) bahan-bahan tak terkalsinasi seperti mineral-mineral kaolinit, feldspar, limbah pengolahan bijih tambang (*tailing*), dan lain-lain.

Material polimer anorganik alkali aluminosilikat dapat disintesis dari prekursor yang mengandung alumina dan silika berkonsentrasi tinggi. Prekursor adalah bahan utama dalam pembentuk geopolimer. Prekursor dapat berupa mineral alami ataupun limbah industri. Unsur-unsur kimia dalam prekursor bila dicampur dengan larutan alkali sebagai aktivator akan menghasilkan material pasta geopolimer dengan kekuatan mengikat. Van Jaarsveld (2003) melaporkan bahwa ukuran partikel, kandungan kalsium, kandungan logam alkali, kandungan amorf dan morfologi serta asal abu layang mempengaruhi sifat-sifat dari geopolimer (Jimēnes, 2007).

Setiap prekursor memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Sebagai contoh metakaolin dapat menghasilkan rasio Si/Al yang terkontrol dalam geopolimer dan memiliki warna putih. Namun, metakaolin relatif lebih mahal untuk diproduksi dalam jumlah besar karena harus dikalsinasi pada temperatur sekitar 500°-700°C selama beberapa jam. Dalam hal ini penggunaan abu layang sebagai prekursor akan menguntungkan jika dilihat dari segi ekonomi (Normalasari, 2010).

### **2.3 Sintesis Geopolimer**

Geopolimer dibuat dengan cara mencampurkan bahan mengandung silika dan alumina salah satu contohnya adalah abu layang, yang dapat bereaksi dengan larutan alkali untuk menghasilkan bahan pengikat (*binder*). Si dan Al yang terdapat dalam abu layang akan bereaksi dengan bantuan natrium hidroksida dan natrium silikat untuk mengikat agregat menjadi geopolimer (Putra *et al.*, 2014).

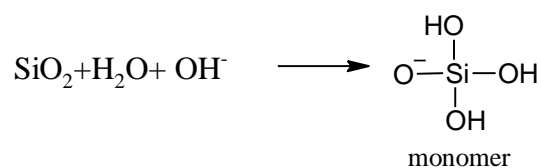
Sintesis geopolimer sangat tergantung pada kondisi bahan awal, yakni sifat dan komposisi abu layang, konsentrasi larutan alkali, dan proses geopolimerisasinya (Jaarsveld *et al.*, 2003). Namun sampai saat ini belum ditemukan pola umumnya, karena setiap abu layang memiliki komposisi yang berbeda tergantung dari asal batubara dan proses pembakarannya, sehingga pada setiap sintesis perlu adanya karakterisasi bahan awal untuk mengetahui parameter bahan awal dan proses

pengerjaannya. Urutan sintesis geopolimer antara lain, pelarutan Si dan Al dari abu layang dengan medium alkali, dan reaksi polikondensasi yang akan membentuk jaringan polisialat ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$ ), polisialat-siloxo ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4$ ), atau polisialat-disiloxo ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 6$ ). Tipe rantai yang berbeda ini akan menghasilkan sifat yang berbeda pula pada geopolimer (Puspitasari, 2010).

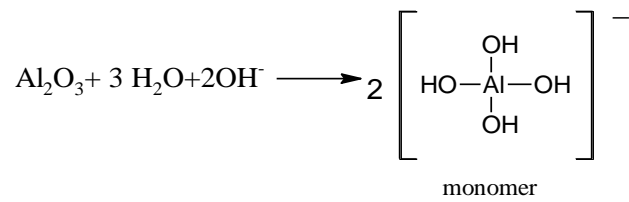
Penelitian tentang efek rasio mol  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  telah dikembangkan lebih lanjut pada geopolimerisasi berbahan dasar metakaolin dan ditemukan berperan penting dalam pembentukan sifat-sifat struktur mikro (Phair *et al.*, 2003). Peranan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{SiO}_2$  dalam geopolimerisasi metakaolin memberikan fakta bahwa sifat-sifat geopolimer ditentukan oleh perubahan yang kecil dari konsentrasi Si dan Al selama sintesis (De Silva *et al.*, 2008). De Silva menyimpulkan bahwa rasio mol  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  bertanggung jawab terhadap perkembangan kekuatan geopolimer. Pada rasio mol  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  rendah, kekuatan awal sangat tergantung pada besarnya  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Al mengontrol waktu pengerasan) sedangkan pada rasio mol  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  yang besar,  $\text{SiO}_2$  akan bertanggung jawab pada pengerasan berikutnya.

Kelarutan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam basa lebih besar dari pada  $\text{SiO}_2$ . Maka dapat ditarik hipotesis bahwa berdasarkan kelarutan yang lebih besar  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dari pada  $\text{SiO}_2$  maka  $\text{Al}_2\text{O}_3$  memiliki peranan yang penting dalam pembentukan sifat awal geopolimer, sedangkan  $\text{SiO}_2$  bertanggung jawab pada pembentukan sifat berikutnya. De Silva (2008) menyebutkan untuk mendapatkan kekuatan yang baik, diharapkan terdapat rasio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  sebesar 3,4-3,8 dalam campuran bahan awal metakaolin. Rasio ini akan berbeda jika digunakan material selain metakaolin. Metakaolin secara kimiawi berbeda dengan abu layang, sehingga reaksinya pun berbeda.

Reaksi geopolimerisasi dimulai dari pelarutan mineral Si-Al sebagaimana digambarkan pada persamaan reaksi 2.1 dan 2.2 (Silva *et al.*, 2007).

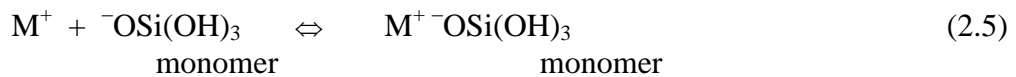
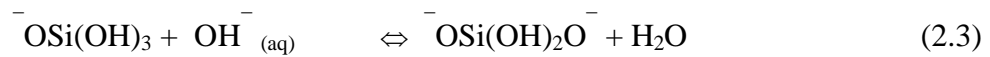


(2.1)



(2.2)

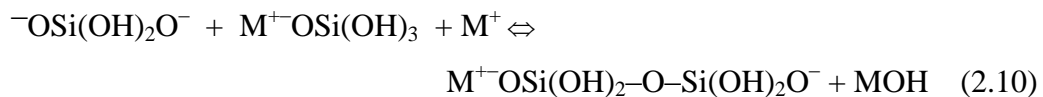
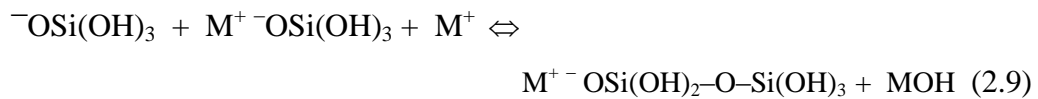
Reaksi monomer silikat dengan basa lebih lanjut adalah sebagai berikut (Xu & Devender, 2000):



Reaksi monomer aluminat dengan basa digambarkan sebagai berikut (Xu & van Deventer, 2000):



Reaksi pembentukan oligomer silikat digambarkan sebagai berikut (Xu & Deventer, 2000) :





Pada pembuatan bahan konstruksi sejenis beton, *solid/liquid* sangat berpengaruh pada sifat fisiknya. Begitu juga geopolimer, rasio *solid/liquid* berpengaruh pada *workability* pencetakan geopolimer dan kuat tekan geopolimer yang dihasilkan. Selain itu, menurunnya nilai *solid/liquid* yang berarti meningkatnya konten larutan aktivator dalam campuran menyebabkan peningkatan kadar air. Adanya air yang cukup, akan memfasilitasi pencampuran dan sebagai media mekanisme transportasi ion. Pengaruh kelebihan air kemungkinan dapat mengakibatkan luluhnya komponen yang lebih mudah larut dan mentransportasi mereka keluar dari zona reaksi (Mijarsh *et al*, 2014).

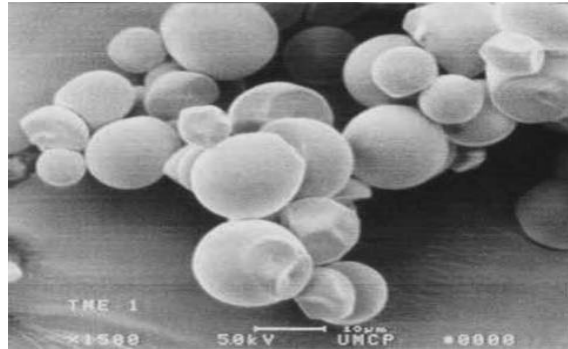
#### 2.4 Pati Ketela Pohon (*Manihot esculenta*)

Ketela pohon merupakan sumber karbohidrat dan makanan pokok bagi beberapa daerah di Indonesia dimana produksi ketela di Indonesia mencapai 20,8 juta ton pertahun (Badan Pertanian Indonesia, 2008). Pati singkong mengandung 83% amilopektin yang mengakibatkan pasta yang terbentuk menjadi bening dan kecil kemungkinan untuk terjadi retrogradasi (Chan, 1983). Ketela pohon dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Magnoliophyta
Kelas	: Magnoliopsida
Ordo	: Malpighiales
Famili	: Euporbiaceae
Genus	: Manihot
Spesies	: <i>Manihot esculenta</i>

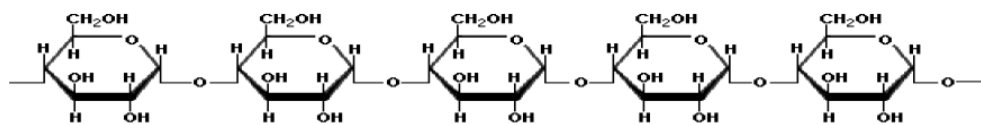
(Murtiningrum, 2012)

Menurut Phillips & Williams (2000) ukuran granula pati singkong 4-35  $\mu\text{m}$ , berbentuk oval, kerucut dengan bagian atas terpotong dan seperti *kettle drum*. Suhu gelatinisasi pada 62 - 73  $^{\circ}\text{C}$ , sedangkan suhu pembentukan pasta pada 63 $^{\circ}\text{C}$ . Menurut Santoso (2005), pati singkong relatif mudah didapat dan harganya yang murah. Bentuk granula pati singkong dengan perbesaran 1500x dapat dilihat pada Gambar 2.2.

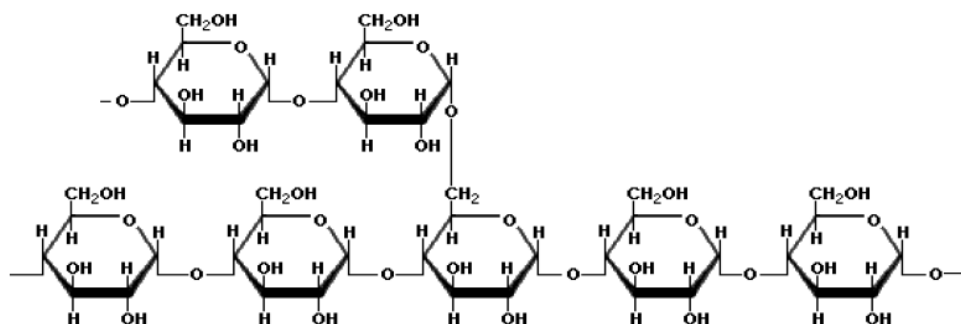


Gambar 2.2. Granula Pati Singkong (Hui, 2006)

Murtiningrum (2012) melakukan karakterisasi pati dari lima kultivar ubi kayu dan didapatkan hasil kadar amilosa pati berkisar antara 12,28% sampai 27,38 % sedangkan kadar amilopektin berkisar antara 72,61% sampai 87,71%. Bentuk granula pati adalah bulat, bulat terpotong, elips dengan ukuran berkisar antara 5–25  $\mu\text{m}$ , suhu gelatinisasi berkisar 65–69°C.



Gambar 2.3. Struktur Amilosa (Akindehunsu, 2015)



Gambar 2.4. Struktur Amilopektin (Akindehunsu, 2015)

Kadar amilosa dan amilopektin dapat ditentukan dengan menghitung kadar pati yang terdapat dalam pati ketela pohon. Perhitungan kadar pati dilakukan berdasarkan kandungan glukosa yang terukur pada titrasi sampel. Prosedur dilakukan sesuai SNI 01-2891-1992. Kadar glukosa dihitung berdasarkan persamaan berikut (Nisah, 2017) :

$$\text{Kadar Glukosa (\%G)} = \frac{w \times fp}{w1} \quad (2.15)$$

Keterangan :

W = glukosa yang terkandung untuk ml  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  yang digunakan (mg).

W1 = bobot sampel

fp = faktor pengenceran

Setelah didapatkan hasil glukosa, selanjutnya menentukan kadar amilosa menggunakan metode spektrofotometri. Penentuan kadar amilosa pada pati dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Nisah, 2017) :

$$\text{Kadar Amilosa} = \frac{x \times V \times F}{W} \quad (2.16)$$

Keterangan :

C = konsentrasi amilosa dari kurva standar (mg/ml)

V = volume akhir sampel (ml)

F = faktor pengenceran

W = berat sampel (mg)

Kandungan amilosa dalam sampel dapat digunakan untuk memperkirakan kandungan amilopektin yang dihitung berdasarkan selisih total kadar pati dengan kadar amilosa (Murtiningrum, 2012). Sifat amilosa sebagai pengikat air, penstabil emulsi, dan agen pembentuk gel sementara amilopektin memiliki sifat alir dan daya kompresibilitas yang kurang baik, tetapi memiliki sifat granuler yang mengembang dan daya pengikat yang baik (Izaguirre, 2010). Akindahunsi *et al.*, (2015) menyatakan bahwa penggunaan pati pada beton dapat



menunda waktu pengerasan di mana periode waktu yang lebih lama diperlukan untuk casting beton.

## **2.5 Karakterisasi Geopolimer**

### **2.5.1 Penentuan Viskositas Pasta Geopolimer**

Viskositas adalah sifat kekentalan dari material yang merupakan salah satu faktor penting dalam pelaksanaan perencanaan campuran. Dalam pasta geopolimer nilai viskositas berbanding lurus dengan kuat tekan (Zhang *et al.*, 2018). Menurut Schmidt (2016) penambahan bahan jenis polisakarida dapat meningkatkan viskositas dalam beton yang berbahan dasar semen. Favier (2013) menyebutkan bahwa semakin tinggi angka viskositas yang dihasilkan maka semakin tinggi pula nilai kuat tekan yang didapatkan. Alat yang digunakan pada pengukuran viskositas adalah *Viscometer Brookfield*.

Pada *Viscometer Brookfield* nilai viskositasnya didapatkan dengan mengukur gaya puntir sebuah rotor silinder (*spindle*) yang dicelupkan kedalam sampel. Viskometer memungkinkan untuk mengukur viskositas dengan menggunakan teknik dalam *viscometry*. Pengukuran viskositas dalam *Viscometer Brookfield*, bahan harus diam dalam wadah sementara itu poros bergerak sambil direndam dalam sampel cair (Atkins, 1996).

### **2.5.2 Penentuan Waktu Pengerasan**

Teixeira-Pinto *et al.*, (2002) mendefinisikan waktu pengerasan sebagai waktu yang dibutuhkan untuk melewati proses transportasi spesies terlarut (Si dan Al) dari permukaan abu layang batubara ke ruang antarpartikel dan proses polikondensasi membentuk struktur tiga dimensi aluminosilikat yang kemudian mengalami pengerasan.

Pengukuran waktu pengerasan geopolimer dilakukan menggunakan alat jarum vicat (*Vicat Needle Apparatus*) sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.5. Jarum vicat yang digunakan memiliki berat  $300 \pm 0,5$  gram dengan diameter  $1,00 \pm 0,05$  mm dan panjang tidak kurang dari 50 mm (ASTM C 191-04). Penentuan waktu pengerasan geopolimer dilakukan dengan penetrasi menggunakan jarum vicat secara berulang dan dilakukan pada titik yang berbeda. Waktu pengerasan

akhir ditentukan ketika jarum vicat tidak dapat menembus pasta geopolimer. (Ariati, 2014)



Gambar 2.5. Alat Jarum Vicat (Ariati, 2015)

Menurut ASTM C 191-01, jarum Vicat yang digunakan memiliki berat 300 gram dengan diameter 1 mm dan panjang 50 mm. Dengan mencatat hasil penetrasi jarum Vicat pada pasta, dapat ditentukan waktu pengikatan awal dan akhir. Waktu pengikatan awal dapat ditentukan dengan interpolasi, yakni pada saat penetrasi jarum Vicat mencapai kedalaman 25 mm. Sedangkan waktu pengikatan akhir adalah ketika jarum Vicat tidak lagi tampak terbenam pada pasta (kedalaman penetrasi 0 mm) (ASTM C 191-01).

De Silva *et al.*, (2008) telah mensintesis geopolimer berbahan dasar metakaolin dan mempelajari waktu pengerasannya berdasarkan rasio mol  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  yang bervariasi. Hasil penelitiannya menyatakan bahwa waktu pengerasan meningkat dengan meningkatnya rasio mol  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Hal ini dimungkinkan terjadi karena rasio mol  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  yang tinggi memiliki jumlah Al yang relatif sedikit. Sedangkan jumlah Al yang tersedia memiliki efek dominan dalam mengendalikan waktu pengerasan. Sehingga, semakin tinggi rasio mol  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  maka waktu pengerasan geopolimer akan semakin besar.

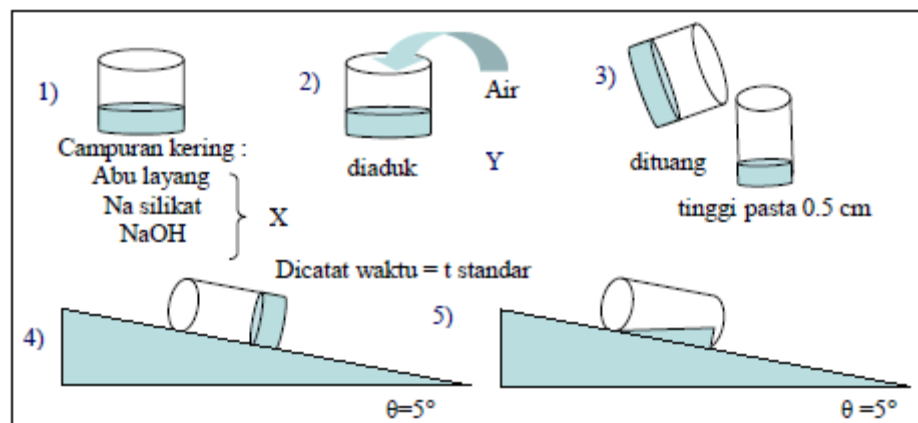
### 2.5.3 Penentuan Konsistensi Pasta Geopolimer

Konsistensi pasta geopolimer merupakan suatu kondisi standar yang menunjukkan kebasahan ideal pada pasta semen. Kebutuhan air yang sesuai pada pencampuran bahan penting untuk diperhitungkan sebelum di aplikasikan, sebab

terlalu banyak air akan menyebabkan pasta menjadi encer, demikian pula bila kekurangan air campuran akan kering sehingga sulit untuk digunakan.

Menurut Taylor (1977) dalam teknologi beton, konsistensi didefinisikan sebagai kapasitas atau kemampuan dari pasta beton, mortar atau pasta semen untuk mempertahankan alirannya. Konsistensi ditandai dengan kekentalan dan kemudahan pengerjaan pasta yang sama dengan waktu alir pasta (Chindaprasirt *et al.*, 2007)

Penentuan konsistensi berdasarkan data waktu alir merujuk pada Chindaprasirt *et al.*, (2007), seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Penentuan Konsistensi Pasta Geopolimer (Chindaprasirt *et al.*, 2007)

Penentuan konsistensi pasta akan menghasilkan jumlah air yang berbeda pada tiap komposisi yang diperlukan untuk mencapai kekentalan pasta yang sama yang ditandai dengan waktu alir pasta yang sama. Untuk menggambarkan konsistensi pasta dibuat perbandingan bahan awal seperti persamaan berikut :

$$\text{Konsistensi} = \frac{\text{Abu Layang} + \text{NaOH} + \text{Na Silikat} + \text{Pati Ketela Pohon}}{\text{H}_2\text{O}} \quad (2.17)$$

#### 2.5.4 Penentuan Kuat Tekan

Kuat tekan (*compressive strength*) adalah besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin uji kuat tekan *Torse Universal Testing Machine*. Pembebanan dilakukan mulai dari beban yang rendah hingga beban maksimum

yang dapat diterima hingga sampel tersebut retak. Data yang didapatkan dari pengujian ini adalah beban maksimum ( $F_{max}$ ) yang mampu diterima benda uji sebelum mengalami keretakan. Kuat tekan dipengaruhi oleh luas permukaan yang dikenai oleh beban. Nilai kuat tekan ( $\sigma$ ) didapatkan dengan memasukkan nilai beban yang terbaca dan luas permukaan kontak sampel ke dalam Persamaan 2.21. (Tjokrodinuljo, 2007).

Hasil pengujian kuat tekan berupa gaya berat dengan satuan kg force (kg.f) selanjutnya dihitung nilai kuat tekannya dengan persamaan 2.18 yang akan menghasilkan nilai kuat tekan dalam satuan MPa (ASTM C39M).

$$F_m = P/A = m \cdot g / \pi r^2 \quad (2.18)$$

dengan:

$F_m$  : kuat tekan dalam psi/MPa;

$P$  : beban maksimum total (N);

$A$  : luas dari permukaan yang dibebani dalam  $m^2$

$m$  : massa beban (kg)

$g$  : gaya gravitasi ( $m/s^2$ )

$r$  : jari-jari (m)

### 2.5.5 Penentuan Kuat Tarik

Kekuatan tarik belah beton merupakan sifat penting yang mempengaruhi perambatan dan ukuran dari retak dalam struktur. Kuat tarik ditentukan menggunakan percobaan pembebanan silinder (*the split cylinder*) dengan silinder ukuran diameter dan tinggi tertentu (Ajie & Irwand, 2012). Pengujian kuat tarik belah silinder (*tensile splitting cylinder test*) dilakukan dengan meletakkan benda uji silinder dalam alat uji dalam posisi horizontal. Beban vertikal diberikan sepanjang selimut silinder berangsur-angsur dinaikkan pembebanannya dengan kecepatan 0,7 hingga 1,4 MPa/menit sehingga dicapai nilai maksimum dan benda uji hancur. Kuat tarik dihitung berdasarkan ASTM C469M-11 sebagaimana terlihat dalam persamaan 2.19.

$$T = \frac{2 \times P}{\pi \times L_s \times d} \quad (2.19)$$

dengan :

$T$  : kuat tarik belah (MPa);

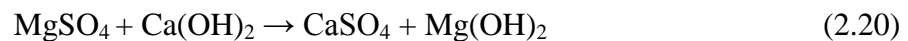
$P$  : beban maksimum yang diberikan (N);

$d$  : diameter silinder (cm);

$L_s$  : tinggi silinder (cm).

### 2.5.6 Ketahanan terhadap Serangan Sulfat

Keawetan geopolimer sebagai bahan pengganti semen sangat dipengaruhi oleh lingkungan yang agresif. Lingkungan agresif biasanya banyak mengandung senyawa-senyawa kimia yang dapat merusak beton. Senyawa ini dapat dijumpai pada air tanah dan air laut yang umumnya mengandung 3,6 – 4% garam-garam terlarut yang terdiri dari 75% natrium klorida (NaCl), 10% magnesium klorida ( $MgCl_2$ ) dan 10% sisanya garam sulfat seperti magnesium sulfat ( $MgSO_4$ ), *gypsum* ( $CaSO_4$ ) dan kalium sulfat ( $K_2SO_4$ ) (Putra, 2006). Diantara garam-garam tersebut, magnesium sulfat merupakan salah satu garam yang paling agresif dan bersifat reaktif pada beton karena mudah bereaksi dengan kalsium hidroksida yang merupakan sisa hasil hidrasi antara semen dengan air. Magnesium sulfat akan bereaksi dengan kalsium hidroksida yang menghasilkan kalsium sulfat (*gypsum*) dan magnesium hidroksida (Husin, 2010). Reaksinya sebagai berikut



Pada tahap selanjutnya *gypsum* akan bereaksi dengan kalsium aluminat hidrat sehingga menghasilkan kalsium sulfoaluminat yang bersifat mengembang sehingga menyebabkan muai dan retak pada beton (Nety dan Tanzil. 2013). Reaksi yang terjadi sebagai berikut:



(Nety & Tanzil. 2013)

*Gypsum* yang terbentuk dapat menimbulkan pembengkakan volume, sehingga kuat tekan akan menurun. Jumlah penambahan kalsium oksida (CaO) yang lebih banyak akan membentuk *gypsum* yang lebih banyak pula, sehingga penurunan kuat tekan geopolimer akan semakin besar pula (Ariati, 2014).

### 2.5.7 Kapasitas Netralisasi Asam (KNA)

Kapasitas netralisasi asam (KNA) menunjukkan kemampuan untuk menetralkan asam yang dinyatakan dalam mol/g (Galiano *et al.*, 2010). Kapasitas netralisasi asam (KNA) dapat ditentukan melalui persamaan 2.22 :

$$\text{KNA} = \frac{\text{mol H}^+ \text{ awal} - \text{mol H}^+ \text{ akhir}}{\text{berat sampel (g)}} \quad (2.22)$$

### 2.5.8 Analisis Ikatan Kimia dengan FTIR (*Fourier Transform Infra Red*)

Spektroskopi FT-IR merupakan spektroskopi inframerah yang dilengkapi dengan transformasi *fourier* untuk deteksi dan analisis hasil spektrumnya. Analisis ini dilakukan untuk mengenal struktur molekul khususnya gugus fungsional. Spektrofotometer digunakan untuk mengukur serapan radiasi inframerah pada berbagai panjang gelombang antara 1400–4000  $\text{cm}^{-1}$  (2,3 – 7,1  $\mu\text{m}$ ). (Hendayana, 1994). FTIR memiliki kemampuan yang cepat dalam menganalisis, bersifat *non destructive* dan preparasi yang sederhana (Ritz *et al.*, 2011)

Prinsip kerja FTIR adalah mengenali gugus fungsi suatu senyawa dari absorbansi inframerah yang dilakukan terhadap senyawa tersebut. Pola absorbansi yang diserap oleh tiap-tiap senyawa berbeda-beda, sehingga senyawa-senyawa dapat dibedakan dan dikuatifikasikan (Sankari, 2010). Secara umum pita-pita vibrasi karakteristik dari geopolimer dapat ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2. Pita-Pita Vibrasi Karakteristik Geopolimer

Bilangan Gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ )	Interpretasi
3700-3600 ( <i>s</i> )	Vibrasi ulur/ <i>stretching</i> (–OH)
3600-2200 ( <i>s</i> )	Vibrasi ulur/ <i>stretching</i> (–OH, HOH)
1700-1600	Vibrasi tekuk/ <i>bending</i> (HOH)
1200-950 ( <i>s</i> )	<i>Stretching asimetri</i> (Si–O–Si dan Si–O–Al)
1100 ( <i>sh</i> )	<i>Stretching asimetri</i> (Si–O–Si)
850 ( <i>sh</i> )	Si–O <i>stretching</i> , OH <i>bending</i> (Si–OH)
795 ( <i>m</i> )	<i>Stretching simetri</i> (Si–O–Si)
688 ( <i>sh</i> )	<i>Stretching simetri</i> (Si–O–Si dan Si–O–Al)
520-532 ( <i>m</i> )	Vibrasi <i>double ring</i>
424 ( <i>s</i> )	Bending Si–O–Si dan O–Si–O)

Keterangan : *s* = *strong*, *w* = *weak*, *m* = *medium*, *sh* = *shoulder*

(Bakharev, 2005)

### 2.5.9 Analisis Fasa Mineral Dengan XRD (*X- Ray Diffraction*)

Analisis fasa mineral geopolimer dilakukan dengan menggunakan XRD (*X- Ray Diffraction*) untuk mengetahui tingkat kristalinitas dan identifikasi fasa

secara kualitatif dari sampel geopolimer. Prinsip kerja XRD yaitu sinar-X menembak sampel padatan kristalin, kemudian mendifraksikan sinar ke segala arah dengan memenuhi Hukum *Bragg*. Detektor bergerak dengan kecepatan sudut yang konstan untuk mendeteksi berkas sinar-X yang didifraksikan oleh sampel. Sampel serbuk atau padatan kristalin memiliki bidang-bidang kisi yang tersusun secara acak dengan berbagai kemungkinan orientasi, begitu pula partikel-partikel kristal yang terdapat di dalamnya. Setiap kumpulan bidang kisi tersebut memiliki beberapa sudut orientasi sudut tertentu, sehingga difraksi sinar-X memenuhi Hukum *Bragg*:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.23)$$

dimana  $n$  adalah orde difraksi (1,2,3,...),  $\lambda$  adalah panjang sinar-X,  $d$  adalah jarak kisi dan  $\theta$  adalah sudut difraksi. Terbentuknya geopolimer ditandai dengan adanya gundukan pada  $2\theta$  antara  $20^\circ$  hingga  $30^\circ$  dan puncak pada  $2\theta$  sekitar  $28^\circ$ . Ketika abu layang digunakan sebagai material awal, fase kristal kuarsa dan mulit akan muncul dalam pola XRD dari sampel abu layang dan akan tetap dalam produk geopolimer yang dihasilkan (Song, 2007).

#### **2.5.10 Analisis Morfologi Partikel Menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*)**

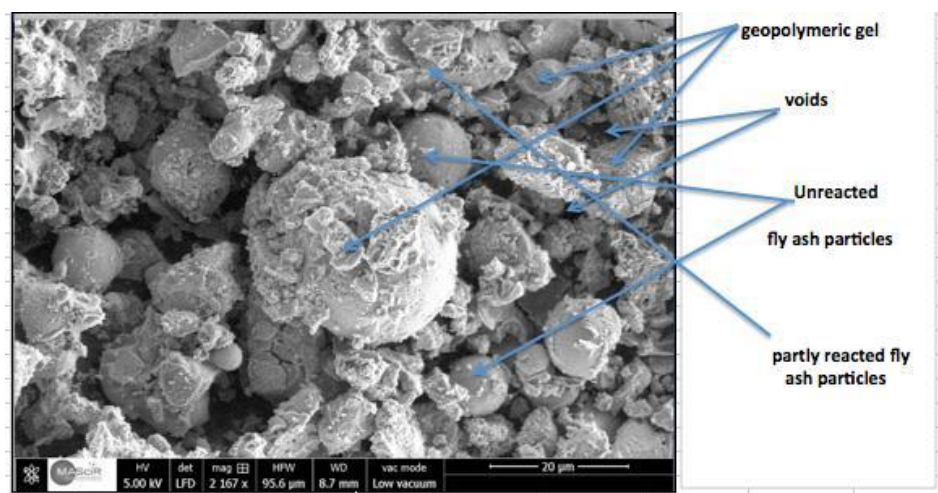
Mikrostruktur dikarakterisasi dengan SEM untuk melihat morfologi geopolimer. SEM terdiri dari sebuah senapan elektron yang memproduksi berkas elektron pada tegangan dipercepat sebesar 2–30 kV. Berkas elektron tersebut dilewatkan pada beberapa lensa elektromagnetik untuk menghasilkan gambar berukuran  $< \sim 10\text{nm}$  pada sampel yang ditampilkan dalam bentuk film fotografi atau ke dalam tabung layar. SEM sangat cocok digunakan dalam situasi yang membutuhkan pengamatan permukaan kasar dengan pembesaran berkisar antara 20 kali sampai 500.000 kali (Anggraeni, 2014).

Cara kerja SEM dimulai dari berkas elektron yang berinteraksi dengan sampel akan menghasilkan *Scndary Electron* (SE) yang didalam detektor SE akan diubah menjadi sinyal listrik dan menghasilkan gambar pada monitor. Sinyal yang keluar dari detektor ini berpengaruh terhadap intensitas cahaya di dalam

tabung monitor, dimana jumlah cahaya yang dipancarkan oleh monitor sebanding dengan jumlah elektron yang berinteraksi dengan sampel. Apabila jumlah elektron yang dipancarkan semakin banyak maka gambar yang dihasilkan semakin terang dan sebaliknya (Masrukan *et al.*, 1999).

Analisis morfologi partikel geopolimer dilakukan dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Gambar 2.9 merupakan mikrograf SEM (*Scanning Electron Microscopy*) geopolimer abu layang batubara yang telah disintesis oleh Alehyen *et al.* (2017). Mikrograf ini menunjukkan geopolimer dengan sebagian atau seluruh partikel abu layang batubara yang tidak bereaksi, dan retakan yang tergambar (Alehyen *et al.*, 2017).

Pembentukan geopolimer ditandai dengan terbentuknya matriks geopolimer. Partikel yang tidak bereaksi terlihat sebagai butiran dalam mikrograf SEM (*Scanning Electron Microscopy*) (Kusumastuti, 2009). Morfologi partikel geopolimer yang didominasi oleh matriks geopolimer yang padat dan homogen mengindikasikan bahwa reaksi geopolimerisasi berlangsung lebih sempurna dan memiliki kuat tekan yang lebih tinggi. Sebaliknya, bila morfologi partikel geopolimer didominasi oleh butiran mengindikasikan bahwa banyak partikel yang tidak bereaksi, sehingga reaksi geopolimerisasi berjalan kurang sempurna dan menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan yang rendah.



Gambar 2.7. Mikrograf SEM (*Scanning Electron Microscopy*) Geopolimer Abu Layang Batu Bara



## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Lokasi Penelitian**

Penelitian dilakukan di beberapa lokasi. Sintesis seopolimer berbahan dasar abu layang dengan penambahan ketela, uji waktu pengerasan, laju alir dan konsistensi dilakukan di Laboratorium Riset Jurusan Kimia Universitas Negeri Semarang. Analisis komposisi kimia abu layang dengan XRF dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Sebelas Maret. Analisis XRF Na Silikat dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro. Analisis kadar amilopektin pati ketela pohon dengan spektrofotometri UV-Vis dilakukan di Laboratorium Chem-Mix Pratama Yogyakarta. Pengukuran viskositas dilakukan di laboratorium Farmasetika Universitas Wahid Hasyim. Kuat tekan, dan kuat tarik geopolimer dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Universitas Negeri Semarang. Analisis ikatan kimia dengan FTIR dilakukan di Laboratorium Kimia Instrumen Universitas Negeri Semarang. Analisis fasa amorf geopolimer menggunakan XRD di Laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang dan analisis SEM dilakukan di Laboratorium Pusat Survei Geologi Bandung.

#### **3.2 Sampel**

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu layang yang berasal dari PLTU Tanjungjati Jepara. Ketela diambil dari jenis ketela pohon pada petani di sekitar Kecamatan Mayong Kabupaten Jepara.

#### **3.3 Variabel Penelitian**

Berdasarkan tujuan penelitian yang ingin dicapai maka variabel yang akan dipelajari dalam penelitian ini dikelompokkan menjadi variabel bebas, variabel terikat dan variabel terkontrol.

##### **a. Variabel Bebas**

Variabel bebas adalah variasi yang harganya divariasikan dan diselidiki pengaruh terhadap variabel terikat dan faktor-faktor yang mempengaruhi hasil analisis. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah

persen (b/b) pati ketela pohon yang ditambahkan pada sintesis geopolimer.

b. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah faktor yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat yang digunakan pada penelitian ini adalah viskositas, konsistensi dan laju alir, waktu pengerasan pasta geopolimer, nilai kuat tekan, kuat tarik. Ketahanan geopolimer terhadap garam sulfat dan kapasitas netralisasi asam diteliti untuk geopolimer dengan karakter tertentu.

c. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi hasil reaksi, namun dapat dikendalikan agar tidak mempengaruhi variabel bebas. Variabel terkontrol dalam penelitian ini meliputi konsentrasi dan jumlah NaOH sebanyak 4g, H<sub>2</sub>O 8g, jumlah Na Silikat sebanyak 10g dalam tiap resep, jenis serbuk ketela pohon, waktu pengadukan pada saat sintesis geopolimer selama 5menit, waktu *curing* 24 jam suhu *curing* 60°C.

### 3.4 Alat dan Bahan

Alat yang dipakai dalam penelitian kali ini meliputi alat untuk sintesis geopolimer dan alat untuk karakterisasi geopolimer. Alat yang dibutuhkan dalam sintesis geopolimer meliputi ayakan Tatonas 100 dan 170 mesh, lumpang, alu, neraca analitik Denver, *beaker glass* Pyrex, pengaduk plastik, wadah plastik, pengaduk (*mixer*), cetakan silinder plastik, loyang, dan oven. Alat yang dibutuhkan dalam karakterisasi geopolimer meliputi mesin penguji kuat tekan (*universal testing machine*), *vicat needle apparatus*, *X-Ray Fluorescence* (XRF), *Scanning Electron Microscopy* (SEM) JEOL JSM-6360LA, spektrofotometri UV-Vis, *X-Ray Diffraction* (XRD) BRUKER 6000, *Viscometer Brookfield*, dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) Analyse=400 Perkin Elmer.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi abu layang batubara yang diambil dari PLTU Tanjungjati Jepara, natrium silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), natrium

hidroksida (NaOH 97% teknis), aquades (H<sub>2</sub>O), Magnesium Sulfat (MgSO<sub>4</sub>) Merck dan pati ketela pohon.

### **3.5 Prosedur Penelitian**

#### **3.5.1 Preparasi Pati Ketela Pohon**

Ketela yang sudah dikupas dan dicuci bersih kemudian diparut. Hasil parutan diperas dan diambil airnya. Hasil saringan diendapkan selama 24 jam. Selanjutnya air dibuang dan sisakan endapan. Endapan kemudian dikeringkan selama 3hari dengan sinar matahari. Selanjutnya dibuat pasta pati ketela 0-3% dari solid (interval 0,5). Pati ketela diaktivasi dengan penambahan 5mL aquades pada suhu 70-90°C hingga menjadi gel (Otoko, 2014). Pasta dibiarkan dingin hingga suhu kamar dan diaduk kuat hingga 10 menit (Yang *et al.*, 2015). Analisis kadar amilopektin pati ketela pohon dilakukan dengan metode SNI 01-2891-1992 menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Nisah, 2017).

#### **3.5.2 Preparasi Abu Layang**

Abu layang dari PLTU Tanjungjati Jepara dioven pada suhu 105°C selama 24 jam. Abu layang yang telah kering selanjutnya diayak menggunakan ayakan 100 mesh. Abu layang selanjutnya dianalisis komposisi kimianya menggunakan XRF untuk mengetahui komponen kimia yang terdapat dalam abu layang (Syukur, 2015).

#### **3.5.3 Pembuatan Larutan Alkali**

Larutan alkali yang digunakan adalah larutan alkali yang dilakukan dengan melarutkan natrium hidroksida (NaOH) dalam aquades (H<sub>2</sub>O) (NaOH : H<sub>2</sub>O = 1 : 2 b/b) (Kusumastuti, 2009). Selanjutnya larutan didiamkan selama 24 jam. Larutan NaOH yang telah didiamkan, dicampurkan dengan natrium silikat sesuai dengan Tabel 3.1 (Van Jaarsveld *et al.*, 2003 & Duxson, 2007).

#### **3.5.4 Sintesis Geopolimer dengan Variasi Pati Ketela Pohon**

Sintesis geopolimer dengan ketela dilakukan dengan memvariasi serbuk ketela antara 0-3% dari berat abu layang interval 1 sebagaimana tertera dalam Tabel 3.1

Tabel 3. 1. Variasi Geopolimer dengan Penambahan Pati Ketela Pohon

No.	Abu Layang (g)	Na Silikat (g)	Berat NaOH	Berat H <sub>2</sub> O (g)	Pati Ketela Pohon (b/b)*(% )	Berat Pati Ketela Pohon (g)
1.	33	10	4	8	0,0	0
2.	33	10	4	8	0,5	0,165
3.	33	10	4	8	1,0	0,33
4.	33	10	4	8	1,5	0,495
5.	33	10	4	8	2,0	0,66
6.	33	10	4	8	2,5	0,825
7.	33	10	4	8	3,0	0,99

\*dihitung dari berat abu layang.

### 3.6 Karakterisasi Geopolimer

#### 3.6.1 Uji Viskositas

Pasta geopolimer yang telah dibuat dilakukan pengukuran viskositas dari pasta geopolimer segar yang diukur dengan *Viscometer Brookfield*. Pasta geopolimer disiapkan ke dalam mangkuk viscometer. Spindel diatur pada kecepatan 100 rpm kemudian diturunkan pada kecepatan 60 rpm setelah satu menit, untuk kemudian dicatat nilai hasilnya (Montes, 2017).

#### 3.6.2 Uji Konsistensi dan Laju Alir Pasta Geopolimer

Uji konsistensi dilakukan dengan menempatkan abu layang, NaOH, Na silikat dan variasi pati ketela pohon (campuran kering diaduk sampai homogen) pada suatu wadah plastik berbentuk kubus, kemudian menambahkan H<sub>2</sub>O sebanyak 8mL sedikit demi sedikit sambil tetap diaduk sampai homogen. Wadah tersebut kemudian dimiringkan dengan sudut kemiringan 5°, dan waktu yang dibutuhkan oleh pasta untuk mencapai posisi horisontal kembali diukur dengan *stopwatch* dan dicatat. Waktu yang dibutuhkan oleh pasta untuk mencapai posisi horisontal kembali ini dapat disamakan dengan waktu alir pasta (Kusumastuti,2009)

Bila pasta terlalu encer maka waktu yang dibutuhkan ini kecil (dikatakan kecepatan alirnya besar) sehingga konsistensinya kecil (pasta mempunyai kemampuan yang kecil untuk mempertahankan deformasi dan aliran). Penentuan

konsistensi berdasarkan waktu alir merujuk pada Chindaprasirt (2007) dan diperoleh menggunakan Persamaan 2.17.

### **3.6.3 Uji Waktu Pengerasan**

Pengukuran waktu pengerasan geopolimer dilakukan menggunakan alat jarum vicat (*vicat needle apparatus*) pada semua spesimen. Pengujian dilakukan di laboratoraium kimia riset Universitas Negeri Semarang. Penentuan waktu pengerasan dilakukan dengan penetrasi menggunakan *vicat needle apparatus* secara berulang dan dilakukan pada titik yang berbeda. Setiap penetrasi dilakukan pengukuran kedalaman jarum dan waktu sejak pasta siap dalam cetakan. Data yang diperoleh setiap spesimen adalah grafik waktu (menit atau jam) terhadap kedalaman jarum (cm). Waktu pengerasan ditentukan ketika jarum vicat tidak dapat menembus pelet (Ariati, 2014).

### **3.6.4 Uji Kuat Tekan**

Kuat tekan geopolimer dilakukan dengan mesin penguji kuat tekan (*universal testing machine*) di Laboratorium Bahan dan Struktur Jurusan Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang pada seluruh sampel geopolimer dengan penambahan pati ketela pohon (0-3%). Sampel uji diberi beban tertentu hingga sampel uji hancur dan pecah. Setiap pengujian dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali uji agar didapatkan kuat tekan rata-rata (Hardjito *et al.*, 2004).

Data yang diperoleh berupa beban terbesar yang dapat ditahan hingga sampel uji hancur (kg). Kuat tekan geopolimer diperoleh dengan memasukkan berat beban tersebut sebagai P dalam Persamaan 2.18.

### **3.6.5 Uji Kuat Tarik Belah**

Pengujian kuat tarik belah silinder geopolimer diukur menggunakan *Torsee Universal Testing Machine* di Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil Universitas Negeri Semarang. Sampel diletakkan pada alat uji dalam posisi horizontal. Beban vertikal diberikan sepanjang selinder dengan berangsur-angsur dinaikan pembebanannya dengan kecepatan 0,7-1,4 MPa/menit hingga didapat nilai maksimum dan terbelah karena beban tarik horizontal. Kuat tarik dihitung berdasarkan ASTM C469M dalam Persamaan 2.19.

### 3.6.6 Uji Ketahanan terhadap Serangan Sulfat

Analisis ketahanan terhadap serangan garam sulfat dilakukan pada sampel dengan variasi penambahan pati ketela pohon 0; 1 dan 3% saat geopolimer berusia 28 hari. Karakterisasi ini dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Sampel geopolimer di rendam dalam larutan magnesium sulfat ( $\text{MgSO}_4$ ) 10% dengan perbandingan berat geopolimer terhadap volume magnesium sulfat ( $\text{MgSO}_4$ ) (mL) adalah 1:4 (Elyamany *et al.*, 2018). Proses perendaman dilakukan selama 7 hari (Nety & Tanzil, 2013). Saat proses perendaman, geopolimer harus ditenggelamkan seluruhnya ke dalam larutan magnesium sulfat (Utama, 2018). Ketahanan geopolimer terhadap serangan sulfat dilakukan dengan membandingkan kuat tekan dan berat geopolimer sebelum dan sesudah perendaman (Chindaprasirt *et al.*, 2013).

### 3.6.7 Kapasitas Netralisasi Asam (KNA)

Analisis kapasitas netralisasi asam dilakukan dengan mengukur pH larutan magnesium sulfat ( $\text{MgSO}_4$ ) 10% sebelum dilakukan perendaman (pH : 5,5 – 7,0) dan sesudah dilakukan perendaman. Karakterisasi ini dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Data yang diperoleh berupa pH magnesium sulfat ( $\text{MgSO}_4$ ) sebelum dan sesudah perendaman geopolimer dalam magnesium sulfat ( $\text{MgSO}_4$ ). Besarnya pH yang diperoleh dikonversi ke dalam  $[\text{H}^+]$ , kemudian diubah dalam mol  $\text{H}^+$ . Kapasitas netralisasi asam dinyatakan dengan selisih jumlah mol  $\text{H}^+$  sebelum dan sesudah perendaman geopolimer dalam magnesium sulfat ( $\text{MgSO}_4$ ) setiap gram geopolimer (Galiano *et al.*, 2010). Kapasitas netralisasi asam dapat ditentukan dengan Persamaan 2.22.

### 3.6.8 Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR (*Fourier Transform Infrared*)

Analisis dengan FTIR digunakan untuk menentukan karakteristik dan gugus fungsi geopolimer sintesis yang terbentuk. Analisis dilakukan pada geopolimer dengan variasi serbuk ketela pada benda uji. Teknik yang akan digunakan untuk preparasi sampel geopolimer adalah teknik KBr dengan

perbandingan 2-3 mg sampel dalam 200-300 mg KBr. Data yang dihasilkan berupa intensitas serapan (%T) dan bilangan gelombang ( $\text{cm}^{-1}$ ). Analisis data dilakukan dengan melihat adanya pita-pita serapan pada bilangan gelombang yang menunjukkan adanya ikatan Si–O–Si dan Si–O–Al pada geopolimer. Uji ini dilakukan pada pati ketela pohon, sampel geopolimer tanpa penambahan pati ketela pohon dan sampel geopolimer yang ditambahkan pati ketela pohon dengan nilai kuat tekan tertinggi dan terendah.

### **3.6.9 Analisis Fasa Mineral dengan XRD (*X-Ray Diffraction*)**

Analisis fasa mineral pada geopolimer dilakukan dengan XRD dengan geopolimer pada usia 28 hari dengan kuat tekan tertinggi, terendah dan tanpa penambahan pati. Analisis ini dilakukan di Laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang. Data yang dihasilkan berupa intensitas dan sudut difraksi ( $2\theta$ ). Setiap sudut difraksi yang dihasilkan dicocokkan dengan pola difraktogram standar pada data base *Software Expert Graphic and Identify* dengan teknik *Search and Match*, sehingga dapat dianalisis jenis mineralnya.

### **3.6.10 Analisis Morfologi dengan SEM (*Scanning Electron Microscopy*)**

Analisis morfologi sampel dilakukan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) pada sampel tanpa penambahan pati ketela pohon dan sampel yang ditambahkan pati ketela pohon dengan hasil kuat tekan tertinggi dan terendah setelah masa penyimpanan 28 hari. Sampel yang digunakan dalam bentuk serpihan. Analisis ini dilakukan di Laboratorium Pusat Survei Geologi Bandung. Sampel geopolimer diambil sebanyak 0,1 gram dan ditempatkan dalam cawan *holder* kemudian dilapisi emas dan dimasukkan dalam evaporator vakum. Gambar mikrograf yang diperoleh dilihat bentuk dan sebaran partikelnya.

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil dan pembahasan disusun berdasarkan pada urutan penelitian yaitu i). Tahap preparasi meliputi preparasi bahan awal (abu layang batubara dan natrium silikat), dan preparasi pati ketela pohon, ii). Tahap sintesis geopolimer dengan penambahan pati ketela pohon, iii). Tahap karakterisasi geopolimer hasil sintesis yang meliputi viskositas, laju alir dan konsistensi geopolimer, waktu pengerasan pasta geopolimer, uji kuat tekan, kuat tarik, ketahanan terhadap serangan sulfat, kapasitas netralisasi asam (KNA), analisis fasa mineral dengan XRD, analisis gugus fungsi dengan FTIR, dan analisis morfologi permukaan menggunakan SEM.

#### **4.1 Preparasi**

##### **4.1.1 Preparasi dan Karakterisasi Bahan Awal**

Abu layang yang digunakan pada penelitian ini adalah abu layang hasil pembakaran batubara yang berasal dari PLTU Tanjungjati Jepara. Secara fisik, kenampakan abu layang dari PLTU Tanjungjati Jepara berwarna abu-abu kehitaman.



(a)



(b)

Gambar 4. 1. Abu Layang Batu Bara Tanjungjati Jepara Sebelum di Preparasi (a) dan Setelah di Preparasi (b)

Gambar 4.1 menunjukkan kenampakan abu layang sebelum dan sesudah di preparasi. Karakterisasi abu layang meliputi komposisi kimia, gugus fungsi dan fasa mineral abu layang. Komposisi kimia abu layang dianalisis menggunakan *XRF BrukerS2 Ranger*.

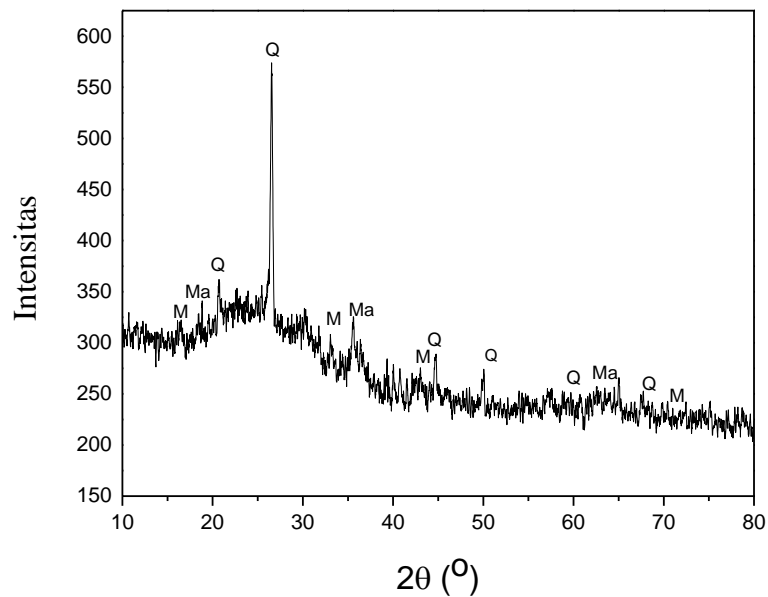


Tabel 4. 1. Komposisi Kimia Abu Layang PLTU Tanjungjati Jepara dengan XRF

No	Nama Senyawa	Jumlah (%)	No	Nama Senyawa	Jumlah (%)
1	SiO <sub>2</sub>	38,08	14	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10
2	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,73	15	BaO	0,10
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,50	16	ZrO <sub>2</sub>	0,07
4	CaO	8,84	17	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04
5	Na <sub>2</sub> O	5,41	18	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	0,04
6	K <sub>2</sub> O	2,97	19	CeO <sub>2</sub>	0,04
7	MgO	2,61	20	ZnO	0,04
8	SO <sub>3</sub>	2,25	21	Rb <sub>2</sub> O	0,03
9	TiO <sub>2</sub>	1,66	22	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03
10	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,29	23	NiO	0,03
11	Cl	0,60	24	SnO <sub>2</sub>	0,02
12	SrO	0,26	25	CuO	0,02
13	MnO	0,15	26	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01

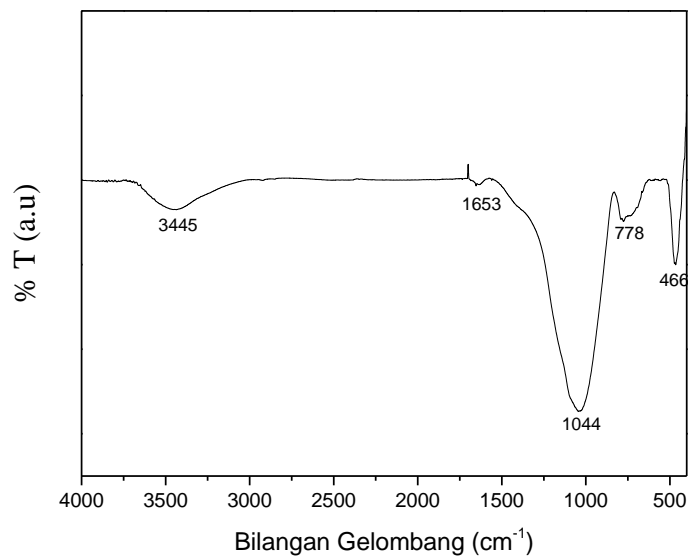
Analisis XRF dilakukan dengan tujuan mengetahui komposisi mineral pada abu layang (Tabel 4.1). Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa komponen utama abu layang adalah SiO<sub>2</sub> 38,08%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 20,73%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14,50%; dan CaO 8,84%. Berdasarkan kandungan CaO yang terdapat pada abu layang PLTU Tanjungjati Jepara termasuk golongan abu layang kelas F, yakni abu layang yang memiliki kandungan CaO < 10% (ASTM C618).

Rasio berat SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam PLTU Tanjungjati Jepara adalah 2,626 atau jika dikonversikan ke dalam rasio mol SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adalah 4,465 (Lampiran 2). Pembentukan rantai Si-O-Al pada geopolimer sangat ditentukan oleh rasio SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bahan awal. Dalam reaksi geopolimerasi, SiO<sub>2</sub> digunakan untuk inisiasi pembentukan monomer, oligomer dan polikondensasi silikat yang dapat mengakibatkan efisiensi geopolimer (Panias, 2007), sedangkan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> digunakan sebagai penghubung antar oligomer silikat yang akan membentuk struktur tiga dimensi (Rees *et al.*, 2007).



Gambar 4. 2. Difraktogram Abu Layang PLTU Tanjungjati Jepara (Q = *Quartz*, M = *Mullite*, Ma= *Maghemite*)

Analisis fasa mineral pada abu layang ditampilkan pada Gambar 4.2. Difraktogram pada Gambar 4.2 memperlihatkan bahwa abu layang PLTU Tanjungjati Jepara berfasa amorf dengan *quartz* dan *mullite* sebagai mineral utamanya. Puncak dihasilkan pada  $2\theta = 20,81^\circ$ ;  $26,53^\circ$ ;  $44,75^\circ$ ;  $50,11^\circ$ ;  $59,89^\circ$  dan  $67,77^\circ$  sesuai dengan  $2\theta$  pada JCPDS no. 05-0490 yang merupakan puncak *quartz* ( $\text{SiO}_2$ ), sedangkan *mullite* ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) pada  $2\theta = 16,51^\circ$ ;  $33,30^\circ$ ;  $42,61^\circ$  dan  $70,59^\circ$  sesuai dengan  $2\theta$  pada JCPDS 03-0258 serta *maghemite* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) pada  $2\theta = 18,81^\circ$ ;  $35,57^\circ$  dan  $62,19^\circ$  sesuai dengan JCPDS 39-1346. *Quartz* dan *mullite* merupakan sumber silika dan alumina yang terdapat dalam abu layang. Puncak-puncak tajam menunjukkan fasa kristalin yang tidak reaktif, sedangkan fasa amorf ditunjukkan dengan gundukan (*hump*) pada  $2\theta = 10-40^\circ$ . Fasa amorf menunjukkan kereaktifan abu layang saat dilarutkan dalam larutan pengaktif sehingga dapat membentuk monomer silikat dan aluminat yang nantinya akan berkondensasi membentuk gel aluminosilikat dengan rantai utama Si-O-Al (Kusumastuti, 2013). Abu layang yang berfasa amorf lebih reaktif sehingga lebih mudah mengalami pelarutan  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam larutan alkali (Li *et al.*, 2013).



Gambar 4. 3. Spektrum FTIR Abu Layang PLTU Tanjungjati Jepara

Gambar 4.3 merupakan hasil spektrum FTIR abu layang yang dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui gugus fungsional pada abu layang PLTU Tanjungjati Jepara. Puncak-puncak hasil analisis menunjukkan adanya vibrasi gugus fungsi yang terkandung dalam abu layang. Pada puncak  $3445\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya vibrasi ulur  $\text{-OH}$  dan  $\text{H-O-H}$ , serapan yang muncul pada  $1653\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya vibrasi tekuk  $\text{H-O-H}$  yang menandakan adanya kandungan  $\text{H}_2\text{O}$  pada sampel abu layang (Song, 2007), serapan yang muncul pada daerah  $1044\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan adanya vibrasi ulur asimetri  $\text{T-O-Si}$  ( $\text{T=Si}$  dan  $\text{Al}$ ) (Bakharev, 2005), puncak pada bilangan gelombang  $778$  menunjukkan vibrasi ulur simetri  $\text{Si-O-Si}$  dan  $\text{Al-O-Si}$  dan serapan pada daerah  $466$  menunjukkan adanya vibrasi tekuk  $\text{Si-O-Si}$  dan  $\text{O-Si-O}$  (Panias *et al.*, 2006).

Penelitian ini menggunakan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) teknis sehingga perlu dianalisis kandungan kimianya terlebih dahulu menggunakan XRF (*X-Ray Fluorescence*). Natrium silikat berguna untuk memperbesar jumlah Si yang terlarut, sehingga didapatkan cukup silikat oligomerik untuk memperpanjang rantainya (Kusumastuti, 2013). Hasil Analisis kandungan kimia dari natrium silikat teknis ditunjukkan pada Tabel 4.2. Pada hasil analisis XRF didapatkan

kandungan  $\text{SiO}_2$  dalam natrium silikat teknis sebesar 37,2%. Rasio mol  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  setelah ditambah natrium silikat teknis adalah 5,78 mol (Lampiran 3).

Tabel 4. 2. Kandungan Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) Teknis dengan XRF

No.	Komponen	Jumlah (%)
1.	$\text{Na}_2\text{O}$	20,52
2.	$\text{SiO}_2$	37,26
3.	$\text{ClO}$	0,05
4.	$\text{K}_2\text{O}$	0,89
5.	$\text{CaO}$	0,03
6.	$\text{ZrO}_2$	0,01
7.	$\text{H}_2\text{O}$	41,32

#### 4.1.2 Preparasi Pati Ketela Pohon

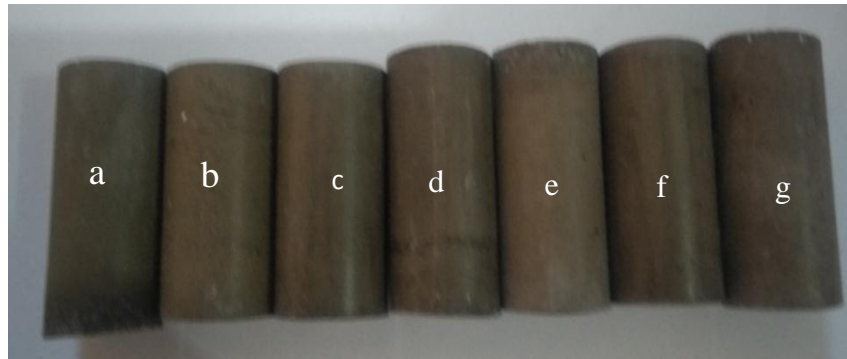
Ketela pohon yang digunakan berasal dari petani ketela pohon di Kecamatan Mayong, Kabupaten Jepara. Gambar 4.4 merupakan tampilan dari pati ketela pohon setelah preparasi. Analisis amilopektin pada pati ketela pohon dilakukan menggunakan metode SNI 01-2891-1992. Hasil analisis kadar amilopektin pada pati ketela pohon yang didapatkan sebesar 77,43% (Lampiran 5). Amilopektin dipilih dalam penambahan geopolimer karena memiliki sifat granuler yang mengembang dan daya pengikat yang baik (Izaguirre, 2010). Preparasi pati ketela diaktivasi dengan pemanasan dalam air pada suhu 70-90°C sehingga didapatkan gel, gel ini diharapkan dapat tercampur dengan pasta geopolimer (Otoko, 2014).



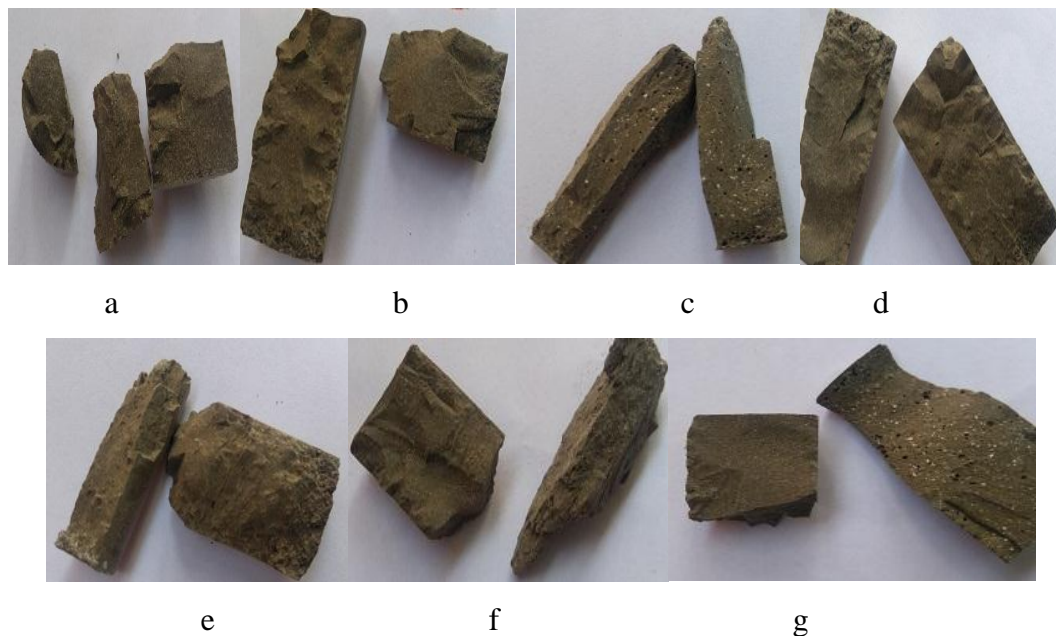
Gambar 4. 4. Pati Ketela Pohon

#### 4.2 Sintesis Geopolimer dengan Penambahan Pati Ketela Pohon

Hasil sintesis geopolimer dengan dan tanpa penambahan pati ketela pohon ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4. 5. Hasil Sintesis Geopolimer penambahan 1% Pati Ketela Pohon (a) Sampel uji geopolimer penampang diameter, (b) Sampel uji geopolimer penampang panjang diambil pada sampel utuh



Gambar 4. 6. Hasil Sintesis Geopolimer Penambahan Pati Ketela Pohon diambil pada keadaan sampel uji belah (a) 0%, (b) 0,5%, (c) 1%, (d) 1,5%, (e) 2%, (f) 2,5% dan (g) 3% penambahan pati.

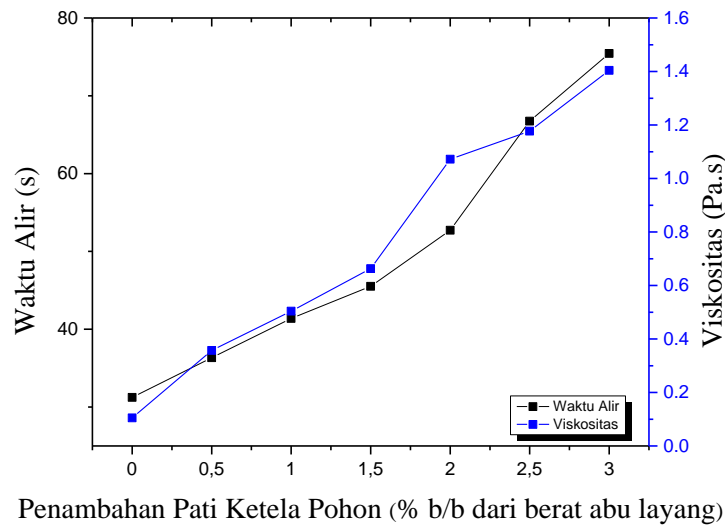


viskositas dan kemudahan pengerjaan pasta yang sama dengan waktu alir (Chindaprasirt *et al.*, 2007).

Tabel 4. 3. Hasil Perhitungan Konsistensi Variasi Penambahan Pati Ketela Pohon

Pati Ketela (% b/b)	Abu Layang (g)	NaOH (g)	Na Silikat (g)	Air (mL)	Konsistensi
0,0	33	4	10	8	5,875
0,5	33	4	10	8	5,895
1,0	33	4	10	8	5,916
1,5	33	4	10	8	5,937
2,0	33	4	10	8	5,952
2,5	33	4	10	8	5,978
3,0	33	4	10	8	5,988

Tabel 4.3 merupakan hasil perhitungan konsistensi pada sampel geopolimer. Perhitungan konsistensi pasta geopolimer dilakukan dengan tujuan untuk menentukan variasi komposisi campuran sehingga didapatkan kemudahan pengerjaan pasta. Nilai konsistensi dihitung dengan membandingkan jumlah abu layang, Na silikat, NaOH dan berat pati ketela pohon dengan jumlah air yang digunakan. Penambahan pati ketela pohon dilakukan guna mengurangi air pencampur yang diperlukan untuk menghasilkan geopolimer dengan konsistensi tertentu, dan menunda waktu pengikatan geopolimer. Tabel 4.3 menyajikan komposisi bahan awal yang digunakan dalam perhitungan konsistensi, dari hasil konsistensi didapatkan nilai konsistensi yang tidak berbeda jauh. Nilai konsistensi terendah yakni penambahan 0% pati dengan nilai 5,875 dan konsistensi tertinggi yakni penambahan 3% pati dengan nilai konsistensi 5,988.



Gambar 4. 8. Hubungan Waktu Alir dan Viskositas

Perhitungan konsistensi tiap komposisi menghasilkan waktu alir yang berbeda pada tiap variasi. Gambar 4.8 merupakan hasil pengukuran viskositas dan waktu alir pasta geopolimer pada seluruh sampel penambahan pati. Gambar 4.8 menunjukkan semakin tinggi pati ketela pohon yang ditambahkan maka semakin lama waktu alir yang dicapai dan semakin tinggi nilai viskositas yang didapat. Waktu alir yang terlalu cepat mengindikasikan campuran terlalu encer (viskositas rendah) yang menunjukkan kemampuan mengalir dan mengisi yang sangat tinggi sehingga dikhawatirkan geopolimer yang dihasilkan berpeluang terjadi *bleeding* (air naik pada permukaan geopolimer) dan akan meninggalkan ruang kosong sehingga menimbulkan lebih banyak rongga/pori yang menyebabkan kuat tekannya menjadi rendah. Sampel geopolimer tanpa penambahan pati memiliki waktu alir terendah yakni 31,24 detik dan nilai viskositas 0,105 Pa.s dan sampel dengan penambahan 3% pati ketela pohon menghasilkan waktu alir lambat yakni 75,45 detik dan nilai viskositas tertinggi yakni 1,404 Pa.s. Besarnya nilai viskositas bahan standar dari bidang konstruksi pada pasta semen berada pada kisaran 0,5-1 Pa.s, sampel yang memenuhi standar ini adalah sampel dengan penambahan 1% dan 1,5% pati ketela pohon dengan nilai viskositas 0,504 Pa.s dan 0,663 Pa.s (Spangenberg *et al.*, 2010). Izaguirre (2010) menyebutkan bahwa



amilopektin memiliki sifat alir yang kurang baik, tetapi memiliki sifat granuler yang mengembang dan daya pengikat yang baik. Jika campuran memiliki nilai waktu alir tinggi maka campuran akan bersifat kaku (viskositas tinggi) sehingga pengerjaan, penuangan dan pemadatan kedalam cetakan menjadi lebih sulit. Akibatnya geopolimer menjadi keropos serta adukan tidak homogen dan menyebabkan mutu beton berkurang (Herwani *et al.*, 2018). Geopolimer dengan mutu tinggi akan dihasilkan apabila viskositas dan kemudahan pengerjaan (*workability*) campuran pasta geopolimer baik sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan industri.

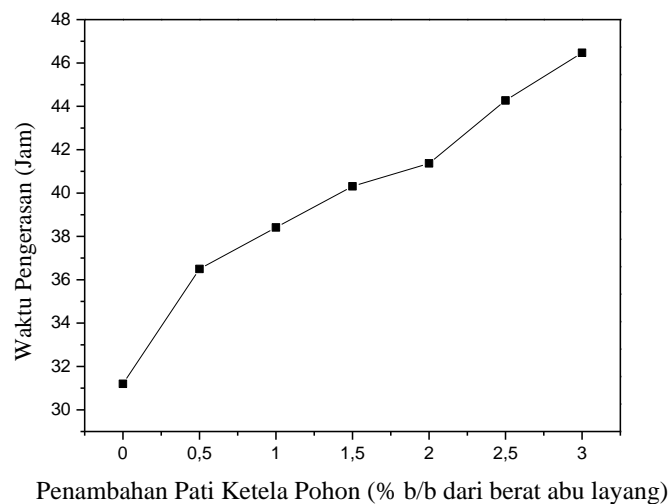
#### 4.3.2 Waktu Pengerasan

Pengukuran waktu pengerasan dilakukan pada semua geopolimer dengan penambahan pati ketela pohon dengan menggunakan alat jarum vicat (*vicat needle apparatus*) dalam cetakan. Hasil pengujian waktu pengerasan geopolimer dengan variasi penambahan pati ketela pohon dapat dilihat pada Gambar 4.9. Berdasarkan Gambar 4.9, dapat diketahui bahwa semakin banyak penambahan pati ketela pohon maka waktu pengerasan akan semakin lama.

Geopolimer tanpa penambahan pati ketela pohon memiliki waktu pengerasan selama 31,2 jam, hasil tersebut jauh lebih lama jika dibandingkan dengan hasil pengujian waktu pengerasan yang dilakukan oleh Wijaya *et al.*, (2017) menggunakan abu layang kelas F dengan kadar CaO 8,23% dengan hasil waktu pengerasan selama 8,84 jam, hal ini bisa jadi dipengaruhi oleh cuaca, kondisi lingkungan dan area saat pembuatan pasta dan pengujian waktu pengerasan berlangsung. Kalsium oksida dalam campuran geopolimer dapat membantu pelarutan padatan aluminosilikat dalam larutan alkali, sehingga akan memerlukan waktu yang lebih singkat untuk mengeras (Temuujin *et al.*, 2009).

Geopolimer dengan penambahan 3% pati ketela pohon memiliki waktu pengerasan paling lama dibanding sampel geopolimer lainnya yakni 46,47 jam. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan pati dapat memperlambat waktu pengerasan dimana kandungan polisakarida dalam pati menyebabkan perlambatan (*retarder*) pada proses hidrasi (Schmidt *et al.*, 2016). Perlambatan waktu

pengerasan dilakukan untuk menunda waktu pengerasan awal geopolimer dalam cuaca panas, atau memperpanjang waktu pematatan untuk menghindari lapisan geopolimer mengeras sebelum sisa pasta selesai dituangkan (*cold joint*) sehingga meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah yang dihasilkan.

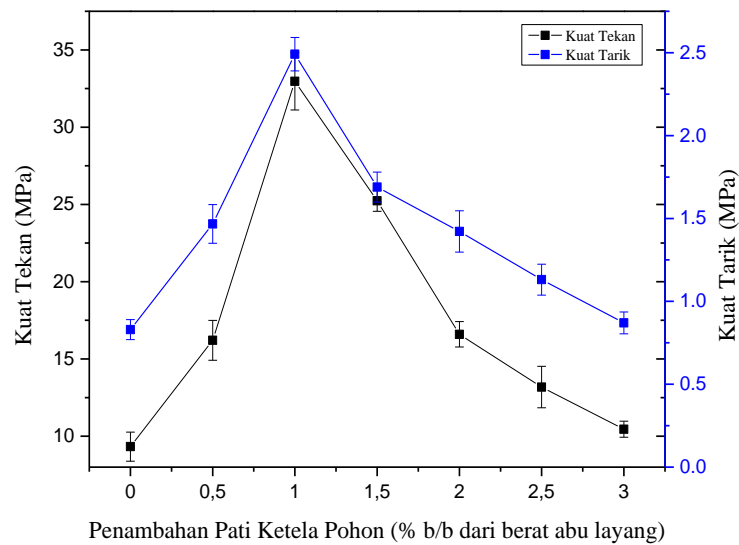


Gambar 4. 9. Grafik Waktu Pengerasan Geopolimer dengan Penambahan Pati Ketela Pohon

Penambahan pati dapat bersifat melembabkan dan menahan lebih banyak air sehingga memperlambat waktu pengerasan awal (Akindehunsu, 2018). Penambahan pati dalam jumlah banyak akan menyebabkan perpanjangan rantai amilopektin seperti yang ditampilkan sebelumnya pada Gambar 4.7 sehingga dibutuhkan waktu yang lama untuk menempatkan diri pada matriks geopolimer.

#### 4.3.3 Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Geopolimer

Gambar 4.10 merupakan grafik kuat tekan dan kuat tarik belah geopolimer dengan variasi penambahan pati ketela pohon. Kuat tekan geopolimer dengan penambahan pati ketela pohon meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah pati yang ditambahkan. Namun, nilai kuat tekan menurun usai penambahan 1% pati ketela pohon.



Gambar 4. 10. Diagram Kuat Tekan dan Kuat Tarik Geopolimer-Pati Ketela Pohon

Tabel 4. 4. Hasil Analisis Kuat Tekan Geopolimer dengan Penambahan Pati Ketela Pohon

No.	Pati Ketela Pohon (%)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
1.	0	9,325	0,829
2.	0,5	16,205	1,467
3.	1	32,966	2,491
4.	1,5	25,573	1,689
5.	2	16,597	1,422
6.	2,5	13,180	1,131
7.	3	10,455	0,870

Gambar 4.10 merupakan hasil kuat tekan dan kuat tarik setelah dilakukan penambahan pati ketela pohon pada sampel geopolimer. Gambar 4.10 menunjukkan bahwa nilai kuat tekan dan kuat tarik meningkat seiring banyaknya pati yang ditambahkan, dan menurun usai penambahan 1% pati. Sampel geopolimer tanpa penambahan pati ketela (0%) memiliki nilai kuat tarik 9,325 MPa dan kuat tekan 0,829 MPa. Penambahan 0,5% pati ketela pohon menyebabkan kenaikan kuat tekan dan kuat tarik menjadi 16,205 MPa dan 1,467 MPa, dan mencapai keadaan optimum pada penambahan 1% pati ketela pohon

dengan kuat tekan 32,966 MPa dan kuat tarik 2,491 MPa. Kenaikan kuat tekan dan kuat tarik tersebut diakibatkan adanya interaksi matriks dengan pati ketela pohon berupa rantai Si-O-Si-O-Al-O yang bereaksi dengan gugus OH yang terdapat pada amilopektin pati ketela pohon membentuk ikatan hidrogen yang ditunjukkan pada Gambar 4.7

Penambahan pati ketela pohon lebih dari 1% mengakibatkan penurunan kuat tekan dan kuat tarik. Penambahan pati dilakukan dengan tujuan memperlambat waktu pengerasan (*retarder*) sehingga campuran akan tetap mudah dikerjakan (*workable*) dalam waktu yang lama, dan sebagai *stabilizing agent* pada campuran geopolimer, selain itu amilopektin pada pati akan meningkatkan adhesi dalam jangka panjang sehingga nantinya nilai kuat tekan akan meningkat (Schmidt *et al.*, 2016). Penambahan pati yang berlebihan akan menyebabkan perlambatan waktu pengerasan yang berlebihan pula. Okafor (2008) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa penambahan pati dapat menunda waktu pengerasan sedikitnya 6 jam, penambahan pati dalam dosis tinggi akan semakin memperlambat lamanya waktu pengerasan. Selain itu, penambahan pati berlebih akan mempengaruhi reaksi pembentukan ikatan hidrogen pada antarmuka amilopektin-geopolimer (Gambar 4.7), semakin banyak amilopektin yang ditambahkan maka semakin banyak rantai amilopektin yang bereaksi dengan rantai Si-O-Al, akibatnya pembentukan matriks akan terganggu sehingga menurunkan nilai kuat tekan dan kuat tarik. Terlihat pada Gambar 4.10 bahwa hasil optimum terjadi pada penambahan 1% pati.

Pengujian kuat tarik belah bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan geser dari komponen struktur yang terbuat dari beton (SNI 03-2491-2002). Wariyatno & Haryanto (2013) menyebutkan bahwa perkiraan nilai kuat tarik beton normal berkisar antara 9%-15% dari nilai kuat tekannya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa hasil kuat tarik belah tertinggi terjadi pada sampel geopolimer dengan penambahan 1% pati ketela pohon, yaitu sebesar 2,491 MPa. Nilai ini mempunyai perbedaan cukup jauh dengan nilai kuat tarik belah hasil perhitungan terhadap kuat tekannya, yakni hanya berkisar 7%. Kuat tekan pada sampel uji mengidentifikasi mutu sebuah struktur bangunan, dimana semakin tinggi

kekuatan struktur maka semakin baik mutu yang dihasilkan. Kuat tekan geopolimer tertinggi yang dihasilkan pada penelitian ini yakni sampel dengan penambahan 1% pati ketela pohon adalah 32,966 MPa yang dapat dikategorikan ke dalam beton mutu sedang. Beton mutu sedang adalah beton yang digunakan untuk pengerjaan struktural dimana dipakai mutu beton dengan kekuatan tekan karakteristik  $K250 \text{ g/cm}^3$  -  $<K400 \text{ g/cm}^3$  atau sekitar 20 MPa – 35 MPa (ACI 318). Beton tipe ini umum digunakan sebagai bangunan bawah jembatan dan beton bertulang.

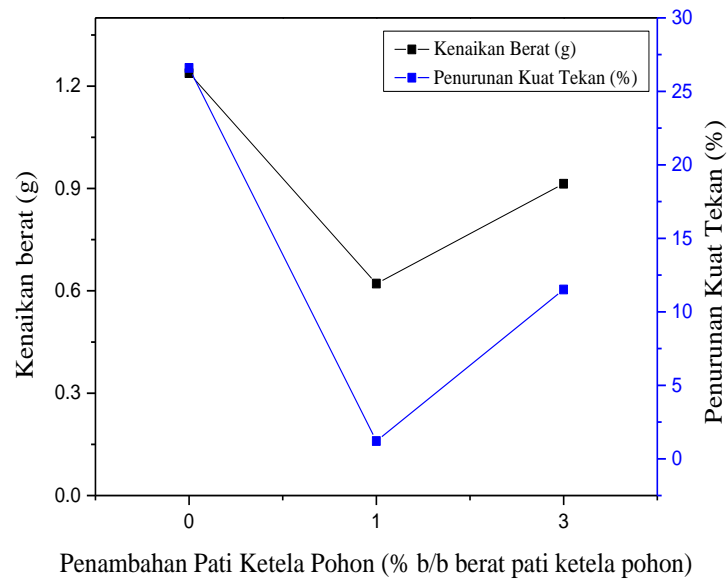
#### 4.3.4 Ketahanan Geopolimer Terhadap Serangan Sulfat

Ketahanan geopolimer terhadap serangan sulfat dapat dianalisis melalui kenaikan berat dan persentase penurunan kuat tekan geopolimer sebelum dan sesudah perendaman dalam magnesium sulfat ( $\text{MgSO}_4$ ) 10% dengan jangka waktu 7 hari.



Gambar 4. 11. Hasil Sampel Geopolimer setelah dilakukan perendaman.

Gambar 4.11 menunjukkan hasil geopolimer setelah dilakukan perendaman dalam larutan  $\text{MgSO}_4$  10% selama tujuh hari. Nilai perubahan massa geopolimer diperoleh dari persentase kenaikan berat sampel dan persentase penurunan kuat tekan diperoleh dari perbandingan selisih kuat tekan sebelum dan sesudah perendaman, dan dinyatakan dalam satuan persen.



Gambar 4. 12. Hasil Pengukuran Berat dan Penurunan Kuat Tekan setelah Perendaman.

Gambar 4.12 merupakan hasil pengukuran berat geopolimer dan hasil pengujian kuat tekan dengan variasi penambahan pati ketela pohon sebelum dan sesudah direndam dengan magnesium sulfat ( $MgSO_4$ ) 10% selama 7 hari. Sampel yang digunakan merupakan sampel dengan penambahan pati 0, 1, dan 3%, sampel dipilih berdasarkan variasi tanpa penambahan, hasil kuat tekan tertinggi dan kuat tekan terendah.

Pada saat perendaman dilakukan,  $MgSO_4$  akan bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam geopolimer yang akan membentuk kalsium sulfat (*gypsum*) sesuai dengan persamaan reaksi 4.2.



Pada tahap selanjutnya *gypsum* mengisi pori pada sampel geopolimer, *gypsum* akan bereaksi dengan kalsium aluminat hidrat menghasilkan kalsium sulfoaluminat yang bersifat mengembang sehingga menimbulkan pembengkakan volume, dan retak pada beton yang nantinya akan menurunkan nilai kuat tekan sesuai dengan persamaan reaksi 4.3 (Nety & Tanzil, 2013).



Hal ini dibuktikan dengan adanya lapisan putih yang ada pada permukaan sampel geopolimer. Hasil terendah terjadi pada sampel tanpa penambahan pati ketela pohon (0%) dengan 1,24g kenaikan berat dan penurunan kuat tekan sebesar 26,59%. Hal ini bisa jadi karena sampel tanpa penambahan pati cenderung memiliki waktu pengerasan lebih cepat sehingga berkemungkinan memiliki lebih banyak pori, selain itu amilopektin akan larut pada suasana basa (perlu dipelajari interaksinya/ pelarutannya dalam basa), sehingga akan menghalangi reaksi antara  $\text{MgSO}_4$  dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Pada hasil sampel dengan penambahan 3% pati hasil kenaikan berat dan penurunan kuat tekan meningkat kembali. Hal ini diakibatkan oleh pengovenan yang dilakukan pada saat waktu pengerasan akhir belum selesai, sehingga menimbulkan retakan pada geopolimer. Pada saat perendaman dilakukan,  $\text{MgSO}_4$  mengisi retakan pada permukaan geopolimer sehingga akan menurunkan kualitas geopolimer yang dihasilkan. Hasil terbaik yakni pada sampel dengan penambahan 1% pati ketela pohon dengan kenaikan berat sebesar 0,62g dan penurunan kuat tekan 1,21%.

#### 4.3.5 Kapasitas Netralisasi Asam

Kapasitas netralisasi asam (KNA) menyatakan kemampuan untuk menetralkan asam (Galiano *et al.*, 2010). Pengujian kapasitas netralisasi asam dilakukan dengan mengukur pH magnesium sulfat sebelum dan sesudah perendaman geopolimer. Sampel yang diuji adalah sampel penambahan pati 0, 1, dan 3%.

Tabel 4.6 merupakan data pengukuran pH magnesium sulfat ( $\text{MgSO}_4$ ) sebelum dan sesudah perendaman geopolimer. Kapasitas netralisasi asam (KNA) pada sampel geopolimer dengan penambahan pati ketela pohon hanya memiliki sedikit perbedaan nilai yakni tertinggi pada sampel tanpa penambahan pati dengan nilai KNA  $14,106 \times 10^{-5}$  dan terendah yakni pada sampel geopolimer dengan penambahan 3% pati ketela pohon dengan nilai KNA  $13,9101 \times 10^{-5}$  mol/g.

Tabel 4. 5. Data pengukuran pH MgSO<sub>4</sub>, dan KNA rata-rata Geopolimer

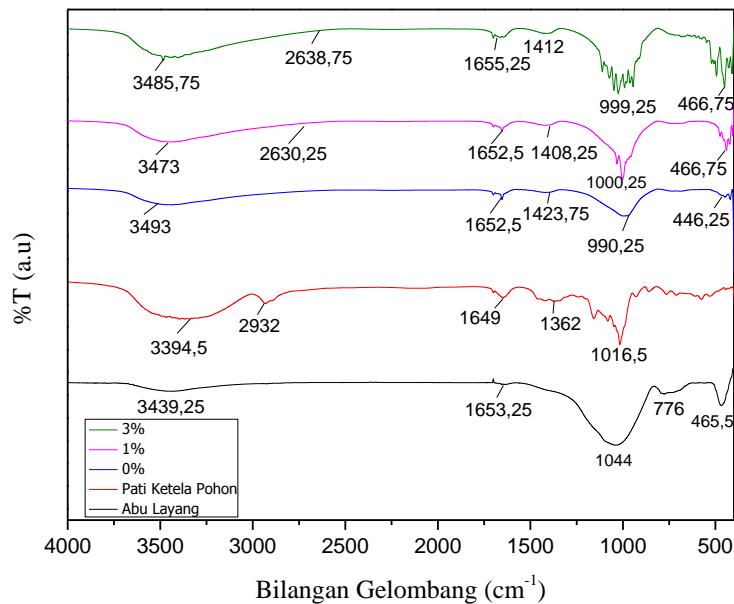
No	Pati Ketela Pohon (%)	Sampel	pH		pH akhir rata-rata	KNA (mol/g)	KNA rata-rata (mol/g)
			pH Awal	pH Akhir			
1	0	I	5,51	10,38	10,393	13,9611 x 10 <sup>-5</sup>	14,106x 10 <sup>-5</sup>
		II	5,51	10,41		14,3728 x 10 <sup>-5</sup>	
		III	5,51	10,39		13,984 x 10 <sup>-5</sup>	
2	1	I	5,51	10,36	10,353	14,0863 x 10 <sup>-5</sup>	14,0639 x 10 <sup>-5</sup>
		II	5,51	10,35		13,9852 x 10 <sup>-5</sup>	
		III	5,51	10,35		14,1202 x 10 <sup>-5</sup>	
3	3	I	5,51	10,32	10,33	13,7923 x 10 <sup>-5</sup>	13,9101 x 10 <sup>-5</sup>
		II	5,51	10,33		13,8158 x 10 <sup>-5</sup>	
		III	5,51	10,34		13,8221 x 10 <sup>-5</sup>	

Selisih nilai KNA pada masing-masing sampel bisa jadi disebabkan adanya penambahan pati pada sampel geopolimer dimana pati bersifat asam sehingga dapat mempengaruhi penurunan pH akhir sehingga nilai KNA semakin berkurang, dalam hal ini penambahan pati ketela pohon menurunkan ketahanan geopolimer terhadap serangan sulfat. KNA berkenaan dengan korosifitas material yang dapat disebabkan oleh lingkungan air laut bahkan hujan asam, maka dalam hal ini, sampel geopolimer termasuk dalam material yang tahan korosi (Ariati, 2015).

#### 4.3.6 Karakterisasi FTIR (*Fourier Transform Infrared*)

Analisis dengan *Fourier Transform Infrared* (FTIR) dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi yang terjadi pada geopolimer. Analisis FTIR dilakukan pada pati ketela pohon, sampel geopolimer tanpa penambahan pati ketela pohon (0%), sampel dengan hasil kuat tekan dan kuat tarik tertinggi yakni penambahan 1% pati ketela pohon, dan sampel dengan nilai kuat tekan dan kuat tarik terendah dengan penambahan 3% pati ketela pohon. Hasil analisis FTIR sampel ditunjukkan pada gambar 4.13.





Gambar 4. 13. Spektra FTIR Abu Layang, Pati Ketela Pohon, Geopolimer 0%, 1% dan 3% Penambahan Pati Ketela Pohon

Gambar 4.13 terlihat bahwa serapan gelombang sampel 0, 1 dan 3 memiliki kemiripan pola. Pita serapan pada bilangan gelombang 3493; 3473; 3485; dan 1652,5  $\text{cm}^{-1}$  berturut-turut menunjukkan vibrasi ulur (stretching) O-H dan vibrasi tekuk (*bending*) H-O-H (Panias & Giannopoulou, 2006). Pita ini menunjukkan bahwa terdapat molekul-molekul air yang terdapat pada permukaan dan rongga dan pori struktur geopolimer. Pita serapan pada bilangan gelombang 1423; 1408,25 dan 1412  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan adanya variasi ulur O-C-O dalam  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  yang dihasilkan dari reaksi karbonasi larutan natrium hidroksida (NaOH) dengan udara (Song, 2007). Terbentuknya geopolimer dapat ditandai dengan adanya pita serapan yang terletak pada bilangan gelombang 1200-950  $\text{cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi ulur Si-O-Si atau Si-O-Al (Bakharev, 2005) dan pita serapan pada 750-490  $\text{cm}^{-1}$  yang menunjukkan vibrasi tekuk Si-O-Si atau Si-O-Al (Panias & Giannopoulou, 2006). Pada sampel 0, 1 dan 3%, ketiganya terjadi serapan pada bilangan gelombang 990,25; 1000,25; dan 999,25  $\text{cm}^{-1}$ , yang menunjukkan bahwa sampel geopolimer 1% dan 3% memiliki bilangan gelombang lebih besar

dibandingkan geopolimer tanpa penambahan pati ketela (0%). Hal ini membuktikan semakin tinggi vibrasi, maka ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al pada geopolimer semakin kuat yang menyebabkan nilai kuat tekan meningkat (Ekawati & Atmaja, 2011).

Tabel 4. 6. Hasil Analisis FTIR Geopolimer

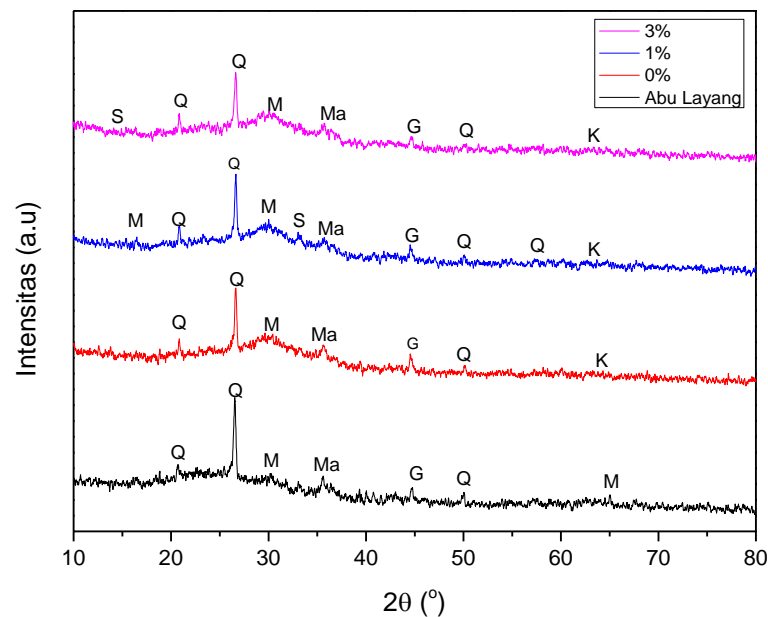
Interpretasi	0%	1%	3%	$1/\lambda$	Referensi
Vibrasi ulur - OH, H-O-H	3493	3473	3485,75	3700-2300	(Panias <i>et al.</i> , 2006)
Ikatan C-H	-	2630,25	2638,75	2300-2900	(Purwanto <i>et al.</i> , 2014)
Vibrasi tekuk (bending) HO-H	1652,5	1652,5	1655,25	1655-1650	(Song, 2007)
Vibrasi Ulur O-C-O	1423,5	1408,25	1412	1410-1430	(Song, 2007)
Vibrasi ulur asimetris Si-O-Si, Si-O-Al	990,25	1000,25	999,25	1200-950	(Bakharev, 2005)
Vibrasi ulur Al-O-Si	446,25	466,75	466,75	750-490	(Panias <i>et al.</i> , 2006)

Perbedaan spektra FTIR pada sampel uji geopolimer dengan penambahan pati terletak pada gelombang  $2630\text{ cm}^{-1}$  dan  $2638,75$  yang merupakan serapan gelombang C-H yang menandakan adanya amilopektin yang terdapat pada geopolimer. Rumus umum amilopektin yakni  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$  yang erat kaitannya dengan hidrogen. Kenaikan intensitas serapan yang terjadi pada  $3473\text{ cm}^{-1}$  yaitu vibrasi ulur -OH menunjukkan terjadinya peningkatan hidrogen pada sampel geopolimer. Ikatan hidrogen yang terjadi yakni Si-O-H dengan atom -H yang berasal dari amilopektin maupun yang berasal dari komponen penyusun lain seperti abu layang dan NaOH.

Peningkatan ikatan hidrogen menyebabkan penguatan ikatan dalam matriks geopolimer, sehingga nilai kuat tekan dan kuat tarik belah sampel meningkat setelah penambahan pati ketela pohon yang mengandung amilopektin. Pati ketela pohon yang digunakan memiliki serapan antara lain vibrasi ulur -OH pada  $3394,5\text{ cm}^{-1}$ , ikatan C-H pada  $2932\text{ cm}^{-1}$ , ikatan C=C pada  $1649\text{ cm}^{-1}$  dan ikatan C-O pada  $1016,5\text{ cm}^{-1}$  (Das *et al.*, 2016).

#### 4.3.7 Karakterisasi XRD (*X-Ray Diffraction*)

Analisis fasa kandungan mineral pada geopolimer dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kandungan fasa mineral dalam geopolimer dan keberadaan fasa amorf didalamnya. Analisis dilakukan pada sampel geopolimer dengan hasil kuat tekan tertinggi, yakni dengan penambahan 1% pati ketela pohon, penambahan 3% pati ketela pohon, dan blanko tanpa penambahan pati ketela pohon.



Gambar 4. 14. Difraktogram abu layang, geopolimer dengan sampel 0%, 1%, dan 3% Penambahan Pati Ketela Pohon, (Q) quartz ( $\text{SiO}_2$ ); (K) kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), (G) Gibbsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), (S) sodalite ( $\text{Al}_6\text{Na}(\text{SiO}_4)(\text{Cl}_2)$ ), (Ma) maghemite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dan (M) mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ).

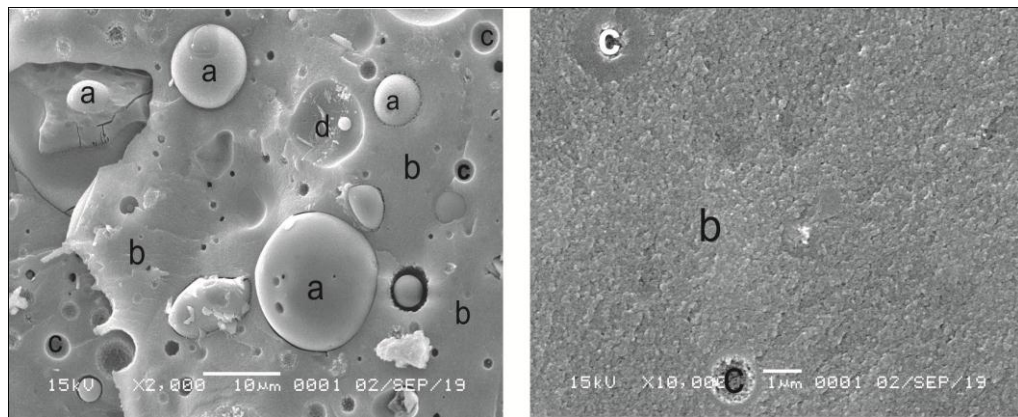
Geopolimer dengan dan tanpa penambahan pati ketela pohon didominasi oleh fasa amorf dengan mineral utamanya adalah *quartz*. Terbentuknya geopolimer ditandai dengan peningkatan gundukan (*hump*) pada  $2\theta$  antara  $20^\circ$  sampai  $40^\circ$  (Phair & Deventer, 2002). Pada gambar 4.13 terlihat bahwa ketiga sampel memiliki puncak-puncak mineral hampir sama, dengan intensitas berbeda yang terlihat dari hasil pola yang didapatkan. Pola difraksi menggambarkan keberadaan fasa kristal dan fasa amorf. Keberadaan fasa kristal dapat dilihat dari adanya puncak-puncak difraksi yang tajam, sedangkan material amorf

memberikan pola difraksi berbentuk punuk (*gundukan/hump*) yang tidak teratur (Pratapa, 2006).

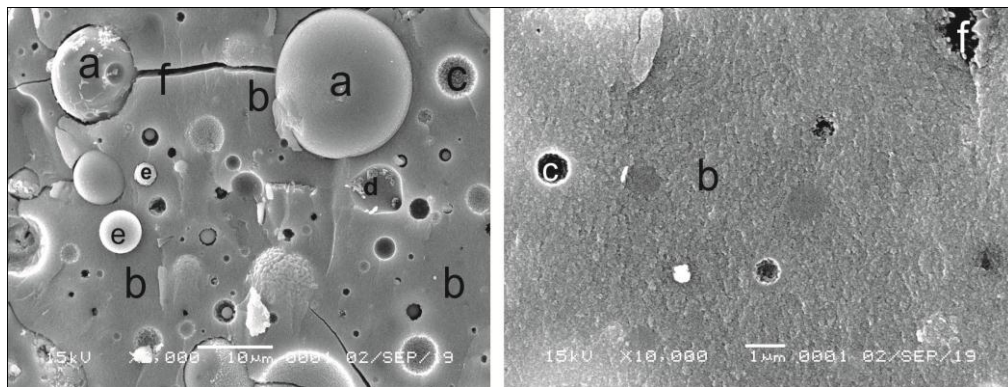
Pada Gambar 4.13 Geopolimer dengan hasil nilai kuat tekan tertinggi yakni sampel V3 didominasi mineral *quartz* ( $\text{SiO}_2$ ), yang ditunjukkan oleh puncak pada  $2\theta = 20,81^\circ$ ;  $26,61^\circ$ ;  $50,61^\circ$  dan  $57,27^\circ$  (JCPDS-05-0490). Mineral *mullite* ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) ditunjukkan pada  $2\theta = 31,03^\circ$  (JCPDS 05-490), mineral *maghemite* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ditunjukkan pada  $2\theta = 35,43^\circ$  (JCPDS03-0862), mineral *sodalite* ( $\text{Al}_6\text{Na}(\text{SiO}_4)(\text{Cl}_2)$ ) ditunjukkan oleh puncak  $2\theta = 33,21^\circ$ , mineral *gibbsite* ditunjukkan pada  $2\theta = 44,73^\circ$  (JCPDS 33-0018) dan mineral *kaolinite* ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) ditunjukkan pada  $2\theta = 63,91^\circ$ . Geopolimer 1% mengandung fasa amorf lebih besar yang lebih luas jika dibandingkan sampel 0% dan 3% ditandai dengan adanya gundukan (*hump*) pada  $2\theta$  sekitar  $15-40^\circ$ . Semakin amorf geopolimer maka material yang bereaksi semakin banyak sehingga rantai geopolimer yang membentuk semakin panjang (Panias *et al.*, 2007). Penambahan pati ketela pohon pada sampel uji dapat mengisi matriks geopolimer yang ada pada sampel uji. Hal tersebut dibuktikan dari geopolimer pada sampel 1% yang memiliki nilai kuat tekan tertinggi yakni 32,966 MPa dan kuat tarik sebesar 2,491 Mpa.

#### 4.3.8 Karakterisasi SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

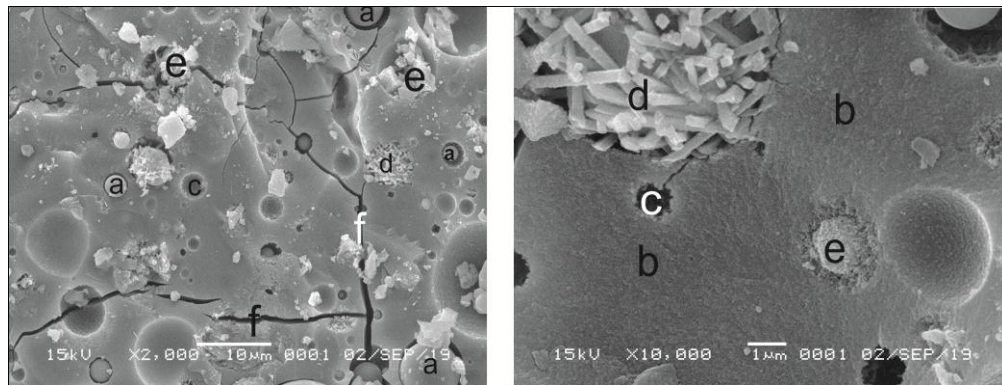
Analisis SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi sampel geopolimer. Pengamatan difokuskan pada terbentuknya matriks geopolimer, kehomogenan struktur morfologi, serta pori dan retakan yang ada pada permukaan sampel. Sampel uji yang digunakan yakni 0%, 1% dan 3% penambahan pati ketela pohon. Pada masing-masing sampel dilakukan perbesaran 2000x, untuk selanjutnya pada bagian matriks geopolimer dilakukan perbesaran 10000x. Hasil analisis SEM pada ketiga sampel ditunjukkan pada gambar 4.15.



(A)



(B)



(C)

Gambar 4.15. Hasil Analisis SEM (A) Sampel geopolimer-Pati Ketela Pohon 0% perbesasan 2000 dan 10000x, (B) Sampel geopolimer-Pati Ketela Pohon 1% perbesasan 2000 dan 10000x (C) Sampel geopolimer-Pati Ketela Pohon 3% perbesasan 2000 dan 10000x dengan (a) Abu layang yang tidak bereaksi, (b) Matriks Geopolimer, (c) Pori, (d) Struktur Jarum, (e) Amilopektin yang tidak bereaksi, (f) retakan (microcracks)

Pada hasil analisis ketiga sampel menunjukkan terbentuknya matriks geopolimer. Matriks pada geopolimer merupakan hasil reaksi dari monomer-monomer alumina dan silika yang membentuk polimer dimana semakin homogen matriks geopolimer yang terbentuk maka semakin tinggi nilai kuat tekan dan kuat tarik yang didapatkan (Rattanask *et al.*, 2011). Pada sampel uji geopolimer 0% lebih banyak didominasi oleh material yang tidak bereaksi sempurna, dan struktur matriks yang kurang homogen sehingga menyebabkan nilai kuat tekan rendah. Pada sampel 1% pati meskipun memiliki beberapa material yang tidak bereaksi, namun menunjukkan struktur matriks yang lebih homogen dibanding dengan 0% sehingga hasil kuat tekan yang dihasilkan relatif tinggi. Sedangkan pada sampel 3% pati menunjukkan matriks geopolimer yang lebih homogen dari sampel 0% dan 1% pati, namun pada sampel ini memiliki cukup banyak retakan (*microcracks*) dan banyak material yang tidak bereaksi sehingga menurunkan nilai kuat tekan yang dihasilkan. Hal ini bisa jadi disebabkan oleh pengovenan yang dilakukan sebelum waktu pengerasan akhir berlangsung, akibatnya amilopektin yang ditambahkan belum menempatkan diri secara sempurna pada matriks geopolimer, sehingga kandungan hidrogen pada geopolimer menguap dan mengakibatkan retakan pada geopolimer.

Hasil analisis pada ketiga sampel menunjukkan terbentuknya struktur jarum di permukaan geopolimer, hal ini bisa jadi diakibatkan karena tingginya konsentrasi larutan alkali, selain itu bisa pula disebabkan karena larutan alkali yang tidak bereaksi setelah proses geopolimerisasi berlangsung sehingga membentuk partikel jarum (Alehyen *et al.*, 2017). Nilai kuat tekan yang dihasilkan sampel 0%, 1%, dan 3% yakni 9,325, 32,966 dan 10,455 MPa, dengan nilai kuat tarik berturut-turut yakni 0,829, 2,491, dan 0,870 MPa.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Simpulan**

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Penambahan pati ketela pohon meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat tarik geopolimer. Persentase pati ketela pohon (b/b) yang ditambahkan untuk menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik tertinggi diperoleh pada penambahan 1% pati dengan hasil kuat tekan 32,966 MPa dan kuat tarik 2,491 MPa. Geopolimer dengan penambahan pati menurunkan sifat ketahanan terhadap serangan sulfat dan kapasitas netralisasi asam yang dibanding geopolimer tanpa penambahan pati. Penambahan pati ketela pohon dalam sifat pasta yakni meningkatkan konsistensi dan nilai viskositas, memperlambat waktu alir pasta dan waktu pengerasan semakin lama seiring dengan banyaknya penambahan pati pada geopolimer.
2. Penambahan pati ketela pohon mempengaruhi hasil analisis XRD (*X-Ray Diffraction*) yang menunjukkan bahwa geopolimer mengandung fasa amorf dengan mineral utama *quartz* yang ditandai dengan adanya gundukan (*hump*) pada  $2\theta$  sekitar  $15-40^\circ$ . Analisis gugus fungsi geopolimer dengan FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) menunjukkan adanya ikatan amilopektin yang ditandai dengan gugus C-H, terbentuknya rantai geopolimer yang ditandai dengan adanya vibrasi ulur asimetri dan vibrasi tekuk Si-O-Si atau Si-O-Al. Analisis morfologi partikel menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) menunjukkan terbentuknya matriks geopolimer yang lebih homogen dan meterial yang tidak bereaksi sedikit yakni pada sampel 1% penambahan pati ketela.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan simpulan yang diperoleh maka saran yang dapat diberikan sebagai berikut :

1. Pengovenan sebaiknya dilakukan pada saat pasta geopolimer benar-benar mengeras sehingga didapatkan hasil yang lebih baik.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut bahan aditif lain sebagai pengganti pati ketela yang memiliki sifat lebih baik dibanding pati, sehingga dihasilkan produk geopolimer dengan kualitas beton mutu tinggi serta proses preparasi yang lebih mudah.



## DAFTAR PUSTAKA

- Ajie, P., & Irawand. (2012). Penelitian Kualitas Beton Beragregat Halus dan Kasar Campuran Agregat Alam dan Slag (Studi Kasus PT. Inti General Yaja Steel, Semarang). Tesis Program Magister Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.
- Akindahunsi, A.A., & Schmidt, W. (2012). Use of Starch Modified Concrete as a Repair Material. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*. Cape Town, South Africa.
- Akindahunsi, A.A., & Uzoegbo. (2015). Strength and Durability Properties of Concrete with Starch Admixture. *International Journal of Concrete Structures and Material*, 9(3): 323-335.
- Akindahunsi, A.A. (2018). Insight Into The Hidration and Micro-Structural Properties of Extracted Starch from Cassava and Maize on Cement and Concrete. *Acta Technica Napocencis : Civil Engineering & Architecture*. 61(1): 91-119
- Alehyan, S., Achouri, EL., & Taibi, M. (2017). Characterization, Microstructure and Properties of Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal of Materials and Environmental Science*. 8(5): 1783-1796.
- Andini, S., Cioffi, R., & Colangelo F. (2007). Coal Fly Ash as Raw Material for Manufacture of Geopolymer-Based Products. *Waste Management*. 28(2): 416-23.
- Anggraeni, D. (2014). Analisa SEM (Scanning Electron Microscopy) dalam Pemantauan Proses Oksidasi Magnetite Menjadi Hematite. *Seminar Nasional Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri*.
- Anwar, S. (2015). Penambahan Serat Batang Pisang pada Material Hibrida Berbasis Geopolimer. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 5(1): 63-68
- Ariati, F.I. (2014). Optimasi Penambahan CaO dalam Sintesis Geopolimer Berbahan Dasar Abu Vulkanik dalam Aplikasinya Sebagai Bahan Pengganti Semen. *Indonesian Journal of Chemical Science*.
- Arini, R.N., Triwulan., & Januarti. (2013). Pasta Ringan Geopolimer Berbahan Dasar Lumpur Bakar Sidoarjo dan Fly Ash Perbandingan 3:1 dengan Tambahan Alumunium Powder dan Serat Alam. *Jurnal Teknik Pomits*, 1(1):1-5.
- Atkins, P.W. (1996). *Kimia Fisika Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.

- ASTM C 191-04. (2002). Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, American Society for Testing and Materials. *Annual Book of ASTM Standards*, 4(1).
- ASTM C125. (1995). Annual Book of ASTM Standart 1995. *Concrete Agregate, Philadelpia*. 4(2):304.
- ASTM C39M. (2014). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. United States: West Conshohocken.
- ASTM C469. (2011). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. United States: West Conshohocken.
- Badan Pertanian Indonesia. (2008). Konsorsium Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim Pada Sektor Pertanian. . *Laporan Tahunan 2008*. Bogor : Balai Pesar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian.
- Bakharev, T. (2005). Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6):1233-1246
- Barbosa, V.F.F & MacKenzie, K.J.D. (2003). Thermal Behaviour of Inorganic Geopolymer dnd Composite Derived From Sodium Polysialate. *Materials Research Bulletin*, 38 (2): 319-331.
- Barbosa, V.F.F.,& MacKenzie, K.J.D. (2002). Synthesis and Thermal Behaviour of Pottasium Sialate Geopolymer. *Material Letters*, 57(2003):1477-1482.
- Caicedo, V.M., & Gutiérrez, R., (2015). Synthesis of Ternary Geopolymers Based on Metakaolin, Boiler Slag and Rice Husk Ash. *DYNA*, 82 (194):104-110.
- Chan, H.T.J.R. (1983). *Handbook Of Tropical Foods*. Marcel Dekker Inc., New York and Bassel.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and Concrete Composites. 29: 224-229.
- Chindaprasirt, P., Rattanasak,U.,& Taebuanhuad, S. (2013). Resistance to Acid and Sulfate Solutions of Microwave-assisted High Calcium Fly Ash Geopolymer. *Material and Structure*, 46(3):375 – 381.
- Das, R.J., Bhuyan, B., & Sharma, H.K. (2016). Fixed Dose Oral Dry Syrup Combination of Norfloxacin and Tinidazole using Natural Polysaccharides : Formulation and Evaluation. *Drug Delivery Letter*,6:77-89.
- Davidovits, J., (1991). Trend in materials science. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8):1633-1656.
- Davidovits, J., (1994). Properties of Geopolymer Cements, Proceeding First International Conference on Alkaline Cements and Concrete, *Scientific Research Institute on Binders and Materials*, 131-149.

- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Application*. France: Institute of Geopolimer.
- De Silva, P. & Sagoe-Crenstil, K. 2008. Medium Term Phase Stability of Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Geopolimer Systems. *Cement and Concrete Research*, 38:870-876.
- De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., & Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetic of Geopolymerization: Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>. *Cement and Concrete Research*, 37(4):512-518.
- Deventer V.J.S.J., Provis, J.L., Duxon, P. & Lukey G.C. (2007). Reaction Mechanisms in the Geopolymeric Conversion of Inorganic Waste to Useful Products. *Journal of Hazardous Materials*, 139(3): 506-513.
- Ekaputri, J. (2013). Sodium Sebagai Aktivator *Fly Ash*, Trass, dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil*, 29(1): 1-10.
- Ekawati, D., & Atmaja, L. (2011). Studi Perbandingan Sintesis Geopolimer Secara Normal dan Terpisah dari Abu Layang PLTU Suralaya. In *Prosiding Kimia FMIPA*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November(ITS).
- Elyamany, H.E., Elmoaty, Abd.M., & Elshaboury, A.M. (2018). Magnesium Sulfate Resistance of Geopolymer Mortar. *Journal of Construction and Building Material*, 184: 111-127
- Fansuri, H., Swastika, N., & Atmaja, L. (2008). Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton. *Jurusan Kimia FMIPA ITS Surabaya*, 3(2): 61–66
- Favier, A., Guillaume, H., Julie, H., & de Lacaillerie, J. (2013). Flow Properties of MK-Based Geopolymer Pastes. A Comparative Study Standart Portland Cement Pastes. *Journal of The Royal Society of Chemistry*.
- Galiano, Y. L., C. F., Pereira, & J. Vale. (2010). Waste Stabilization/Solidification (S/S) of EAF Dust Using Fly Ash-Based Geopolymers. Influence of Carbonation on The Stabilized Solids. *Journal of Coal Combustion and Gasification Product*, 2: 1 – 8.
- Hakim. Y. (2017). Pengaruh Penambahan Serat Eceng Gondok (*Eichornia crassipess*) dan Serbuk Aluminium terhadap Karakteristik Geopolimer Berbasis Abu layang Batubara. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 6(3): 215-222
- Hardjito, D., S.E. Wallah, Sumajouw, M.J. & Rangan, B.V. (2004). Factors Influencing The Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Jurnal Dimensi Teknik Sipil*, 6(2): 88-93.
- Hasanbeigi, A., Lu, H., Williams, C, & Price, L. (2012). *International Best Practices and Co-Processing Municipal Solid Waste and Sewage Sludge in*

- the Cement Industry*. California : Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Herwani., Imran, I., Budiono, B., Pane, I., Zulkifli, E., & Elvira.(2018). Efektivitas Superplasticizer Terhadap Workabilitas dan Kuat Tekan Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(2): 12-18.
- Hidayat. S., (2009). *Semen, Jenis dan Aplikasinya*. Jakarta: PT. Pustaka Kawan.
- Hilman, M. (2010). *Indonesia Second National Communication Under The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. Republic of Indonesia Ministry of Environment.
- Holmberg, K., Jonsson, B., Kronberg, B., & Lindman, B. (2004). *Surfactans and Polymers in Aqueous Solution* (2nd edition). John Wiley & Sons Inc. USA.
- Hui, Y. C. (2006). *Hand Book of Food Science Technology And Engineering*. Vol. 1. London : CRC Press Taylor & Francis Group.
- Hwang, J. Y. (1999). Beneficial Use of Fly Ash. *Project for Department of Energy's Federal Energy Technology Center and Michigan Technological University's Institute of Materials Processing*, Michigan Technological University.
- Izaguirre, A., (2010). Behaviour of starch as a Viscosity Modifier for Aerial Lime-Based Mortars. *Carbohydrate Polymers*, 80:222–228.
- Jaarsveld, J., Deventer, J. & Lukey, G. (2003). The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-based Geopolymers. *Materials Letters*, 57(7): 1272-1280.
- Ji, X., Song, M., & Pang, M. (2013). Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Sticky Rice–lime Mortar, *Architecture Technology*,(6): 540–3.
- Jiménez, F. (2007). Alkali-Aggregate Reaction Inactivated Fly Ash System. *Cement Concrete Res*, 37: 175-183.
- Kim, B. & Prezzi, M. (2008). Evaluation of the Mechanical Properties of Class-F Fly Ash. *Waste Management*, 28: 649-659.
- Knaus, S. & Bauer-Heim, B. (2003). Synthesis and Properties of Anionic Cellulose Ethers: Influence of Functional Groups and Molecular Weight on Flowability of Concrete. *Journal of Carbohydrate Polymers*, 53(4): 383-394
- Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., & Sagoe-Crentsil, K. (2007). Comparative Performance of Geopolymers Made With Metakaolin and Fly Ash After Exposure to Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Research*, 37(12): 1583-1589

- Kupaei, R., Alengaram, U., & Jumaat, M., (2014). The Effect of Different Parameters on The Development of Compressive Strength of Oil Palm Shell Geopolymer Concrete. *The Scientific World Journal*, 1-16
- Kusumastuti, E. (2013). Sintesis Geopolimer Berbahan Abu Vulkanik dengan Penambahan Aluminium Hidroksida Sebagai Pengatur Rasio Silika dan Alumina. *Junal Sains dan Teknologi*, 11(1):45-56.
- Li, J. & Zhang, B. I. (2018). Why Ancient Chinese People Like to Use Organic–Inorganic Composite Mortars Application History and Reasons of Organic–Inorganic Mortars in Ancient Chinese Buildings. *Journal of Archaeol Method Theory*, 1-35.
- Li, Z., Chen, R., & Zhang, L. (2013). Utilization of Chitosan Biopolymer to Enhance Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal of Mater Science*, 48:7986–7993.
- Masrukan., Wagiyono., & Aditoyanto. (1999). Pemeriksaan Mikrostruktur dan Analisis Unsur AlMgSi Menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM)-EDS. *Prosiding Seminar Nasional Hmburan Neutron Dan Sinar X Ke-2*. Bandung: Puslitbang Iptek Bahan-Batan.
- MCCaffery, R. (2002). Climate Change and The Cement Industry. *Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)*, Vol.2:15-19.
- Metha, P.K., (2001), Reducing The Environmental Impact of Concrete, *ACI Concrete International*, 23(10):61- 66.
- Mijarsh, M.J.A., Johari, M.A.M., & Ahmad, Z.A. (2014). Synthesis of Geopolymer from Large Amounts of Treated Palm Oil Fuel Ash: Application of the Taguchi Method in Investigating the Main Parameters Affecting Compressive Strength. *Construction and Building Materials*, 52:473-481.
- Molina, D., Meija-Arcila, M., & Gutierrez, R. (2015). Mechanical and thermal performance of a geopolymeric and hybrid material based on fly ash. Thesis Master of Science in Civil Engineering Louisiana State University.
- Montes, C. (2015). Rheological Behavior of Fly Ash – Based Geopolymers With The Addition of Superplasticizers. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 1(4): 179-185.
- Munir, M. (2008). Pemanfaatan Abu Batubara (fly ash) untuk Hollow Block yang Bermutu dan Aman bagi Lingkungan. Laporan Penelitian Magister Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro.
- Murtiningrum. (2012). Karakterisasi Umbi dan Pati Lima Kultivar Ubi Kayu (*Manihot esculenta*). *Jurnal Agroteknologi*, 3(1):81-90.

- Nety., & Tamzil, Gunawan. (2013). Pengaruh Sulfat terhadap Kuat Tekan Beton dengan Variasi Bubuk Kaca Substitusi Sebagian Pasir dengan W/C 0,4 dan 0,5. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 1(1): 63-67
- Nikolic V., Komljenovic, M., & Marjanovic, N. (2014). Lead Immobilization by Geopolymers Based on Mechanically Activated Fly Ash. *Ceramics International*, 40: 8479-8488.
- Nisah, K. (2017). Studi Pengaruh Kandungan Amilosa dan Amilopektin Umbi – Umbian Terhadap Karakteristik Fisik Plastik Biodegradable dengan *Plasticizer* Gliserol. *Jurnal Biotik*, 5(2):106-113.
- Nur, R. A., Triwulan, & Ekaputri, 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*, 1:1-5.
- Olivia, M., P. Sarker, & H. Nikraz. 2008. Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. *ICCBT - A* – 46: 517-530
- Otoko, G.R. (2014). Minimizing Hot Weather Effect on Fresh and Hardened Concrete By Use of Cassava Powder as Admixture. *European International Journal of Science and Technology*, 3(2):1-8
- Palomo, A., Grutzeck, M.W. & Blanco, M.T. (1999). Alkali-activated FlyAshes: A Cement for the Future. *Chemistry Concrete Research*, 29(8): 1323-1329.
- Panias, D., Giannopoulou, I. P., & Perraki, T. (2007). Effect of Synthesis Parameters on the Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 301:246–254.
- Persada, M. B., Kusumastuti, E., & Mahatmanti, W. (2018). Immobilisasi  $Fe^{3+}$  dan  $Cr^{3+}$  pada Geopolimer Berbasis Abu Layang-Abu Sekam Padi. *Indonesian Journal of Chemical Science*. 7 (1): 77-85.
- Phair, J.W. & Deventer, J.S.J. (2002). Effect of the Silicate Activator pH on the Microstructura Characteristics of Waste-Based Geopolymers. *International Journal of Mineral Processing*, 66: 121-143.
- Phillips, G.O., & Williams, P.A. (2000). *Handbook of hidrocolloids*. Boca Raton: CRC Press.
- Pratapa, S. (2006). Difraktometer Sinar-X dan Pengumpulan Data Difraksi Sinar-X. Retooling Program Batch IV (Basic Science Chemistry). Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan ALam Intitut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Puspitasari, Y., & Atmaja, L. (2010). Sintesis dan Karakterisasi Geopolimer Berdasarkan Variasi Rasio Mol  $SiO_2/Al_2O_3$  dari Abu Layang PLTU

Suralaya. *Prosiding Skripsi*. Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh November .

- Putra, D. (2006). Penambahan Abu Sekam pada Beton dalam Mengantisipasi Kerusakan Akibat Magnesium Sulfat Pada Air Laut. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 10(2): 195-203.
- Putra, A.K., Wallah, S.E., & Dapas, S.O. (2014). Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 2(7): 330-336.
- Quere, C., Andrew, R. & Canadel, J. (2016). Global Carbon Budget 2016. *Earth Syst. Science Data*, 8:605-649
- Rangan, B. V. & Hardjito, D. (2005). Development and Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Research Report GC-II*. Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth Australia.
- Rattanasak, U., Kanokwan P., & Prinya C. (2011). Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 18(3): 364–369.
- Rees, C.A., Provis, J.L., Deventer, J.S.J., & Luckey, G.C. 2007. The Mechanism of Geopolymer Gel Formation Investigated Through Seeded Nucleation. *Colloids and Surface A : Physicochemistry Engineering Aspects*, 318: 97-105
- Rohmawati, L., & Setryarsi, W. (2014). Studi Kekuatan Mekanik Komposit Serat Alam/Resin Epoxy. *Journal Berkala Fisika Indonesia*. 6(2): 40-46.
- Safitri. E., & Djumari. (2009). Kajian Teknis dan Ekonomis Pemanfaatan Limbah Batubara (fly ash) Pada Produksi Paving Block. *Media Teknik Sipil* ISSN 1412-0976 Surakarta.
- San, P., Subaer., & Sujiono, E.H. (2016). Pengembangan Geopolimer Tipe Poly (Ferro-Sialate) Berbahan Dasar Lempung Laterit untuk Aplikasi Material Struktural. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 12(3), 337-345.
- Schmidt, W., Henricus, J., & Birgit, M. (2016). Interactions of Polysaccharide Stabilising Agents with Early Cement Hydration without and in the Presence of Superplasticizers. *Journal of Constructon and Building Material*, 130:584-593
- Schmidt, W., Sonebi, M., Brouwers, J., Han-Carsten., & Birgit, M. (2013). Rheology Modifying Admixture: The Key to Innovation In Concrete Thechnology – A General Overview and Implication for Africa. *International Congress on Material and Structural Stability Building up Sustainable Material Construction*.

- Setiawan, A. (2015). Beton Geopolimer Abu Serabut Kelapa. *Jurnal Konstruksia*, 6(2):91-97.
- Song, X. (2007). Development and Performance of Class F Fly Ash Based Geopolymer Concretes against Sulphuric Acid Attack. Thesis of Australia: School of Civil and Environmental Engineering The University of New South Wales Sydney.
- Spangenberg, J., Roussel, N., Hattel, J.H., Thorborg, J., Geiker, M.R., Stang, H., & Skocek, J. (2010). Prediction of the Impact of Flow-Induced Inhomogeneities in Self-Compacting Concrete (SCC). *Flow-Induced Heterogeneities in SCC*. Proc of SCC2010, Canada.
- Sun, P., & Wu. (2008). Transition from Brittle to Ductile Behavior of Fly Ash Using PVA Fibers. *Cement Concrete Composites*, 30(1):29-37
- Syukur, M. (2015). Sintesis dan Karakterisasi Foamy Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang Batubara. *Indonesian Journal of Chemical Science*,4(3):189-195
- Taylor, W.H. (1977). *Concrete Technology and Practice (4ed)*. McGraw-Hill Book Company, Sidney.
- Teixeira-Pinto, A., Fernandez, P., & Jalali, S. (2002). Geopolymer Manufacture and Application – Main Problems when Using Concrete Technology. *Proceeding of International Conference on Geopolymer*, 28-29 Oktober, Melbourne, Australia.
- Tjokrodinuljo, K. (2007). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: KMTS FT UGM.
- Utama, H. (2018). Pengaruh Konsentrasi NaOH Terhadap Ketahanan Sulfat Mortar Geopolimer dengan Precursor *Fly Ash* dan Abu Sekam Padi. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*.
- Walmiki, T.S., & Pambudi, P.P. (2013). Pembuatan geopolimer dari Metakaolin dan Abu Terbang. Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Intitute Tenologi Bandung, 11:265-274.
- Wariyatno, N.G., & Haryanto, Y. (2013). Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah sebagai Estimasi Kekuatan Sisa pada Beton Serat Kaca Aluminium Akibat Variasi Suhu. *Dinamika Rekayasa*, 9:21-28.
- Wijaya, A.L., Ekaputri, J.J., & Triwulan. (2017). Factors Influencing Strength and Setting Time of Fly Ash Based-Geopolymer Paste. *Matec Web of Conferences*, 138,01010.
- Xu, H. & Van Deventer, J. S. J. (2000). The Geopolymerisation of Alumino-silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59:247-266.

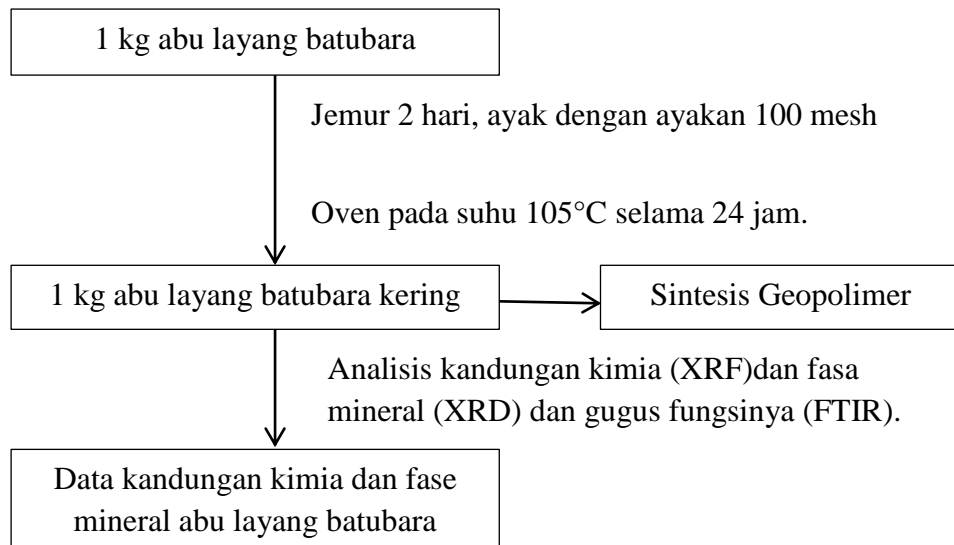


- Yang, F.W., Zhang, B.J., ChangChu P., & YuYao, Z. (2009). Traditional Mortar Represented by Sticky Rice-Lime Mortar. *Science in China, Series E: Technoloical Sciences*, 52 (6):1641–1647.
- Zhang, S. F. & Yang, J. Z., (2008). Dispersing Mechanism of Carboxymethyl Starch as Water-Reducing Agent. *Journal of Applied Polymer Science*, 105: 486-497.
- Zhang, Da-Wang., Wang, D., Liu, Z. & Xie, F. (2018). Rheology, Agglomerate Structure, and Particle Shape of Fresh Geopolymer Pastes with Different NaOH activators content. *Journal of Construction and Building Material*.
- Zeng, Q. (2003). On Architectural Features and Humanistic Values of The Ancient Pagodas in Taizhou (in Chinese). *Huazhong Architect*. 21:83-86
- Zhong & Wille, K. (2015). Material Design and Characterization of High Performance Pervious Concrete. *Journal of Construction and Building Materials*,98:51-60.

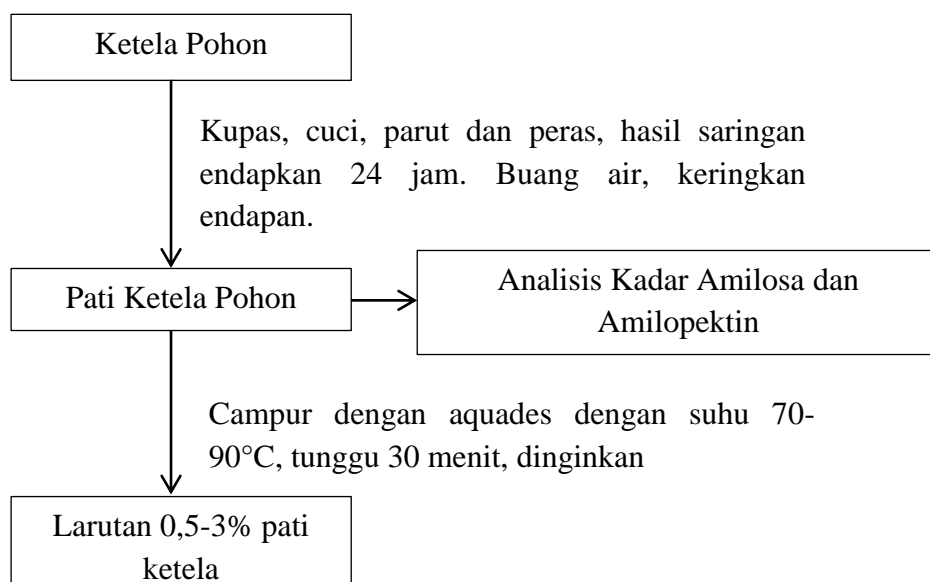
## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Skema Kerja Penelitian

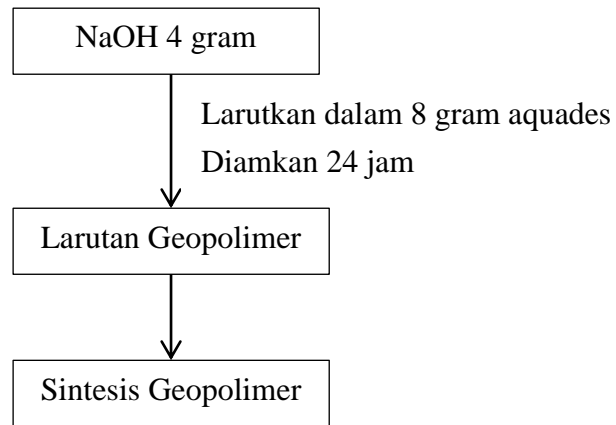
#### 1. Preparasi Abu Layang



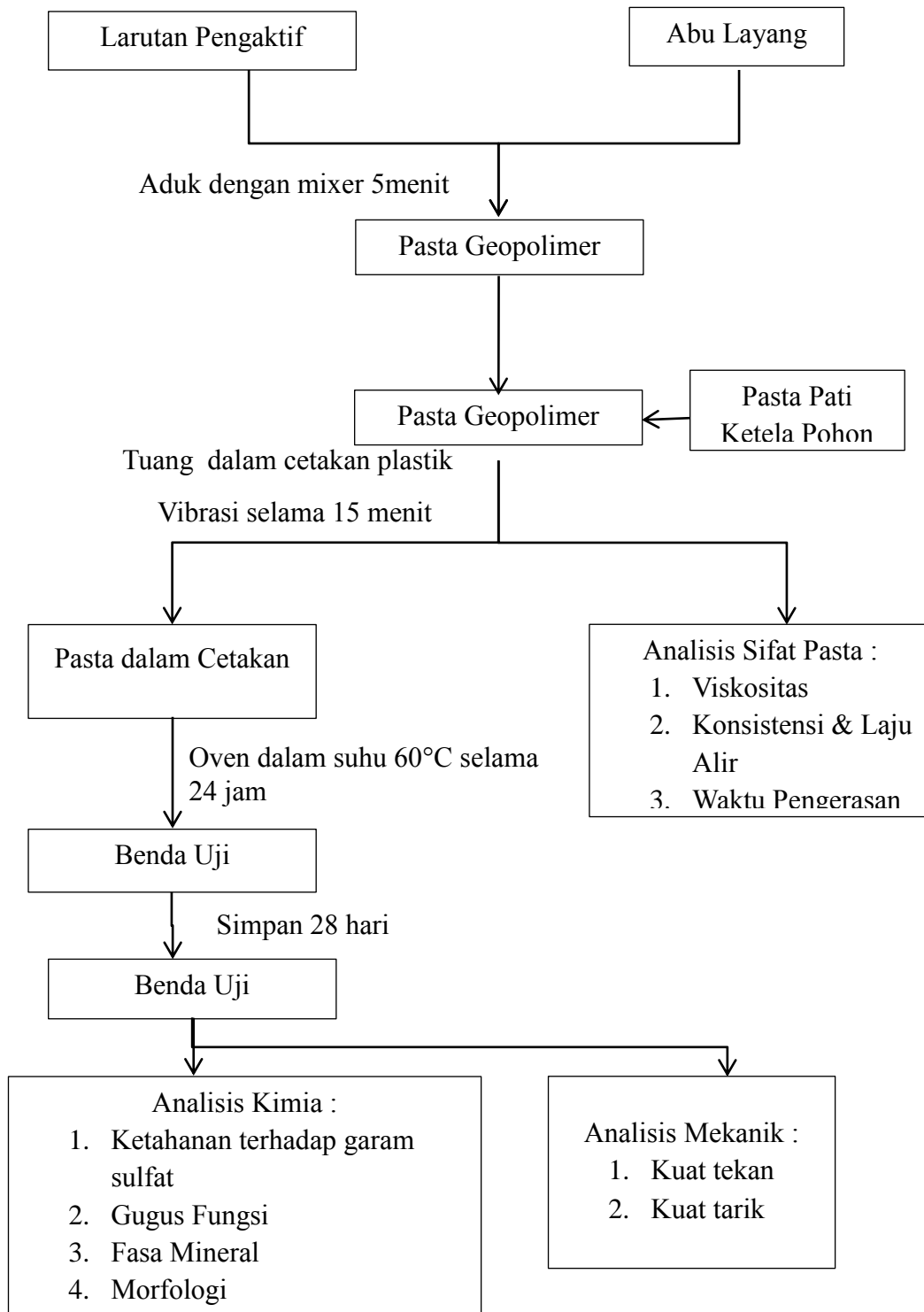
#### 2. Preparasi awal pati ketela pohon



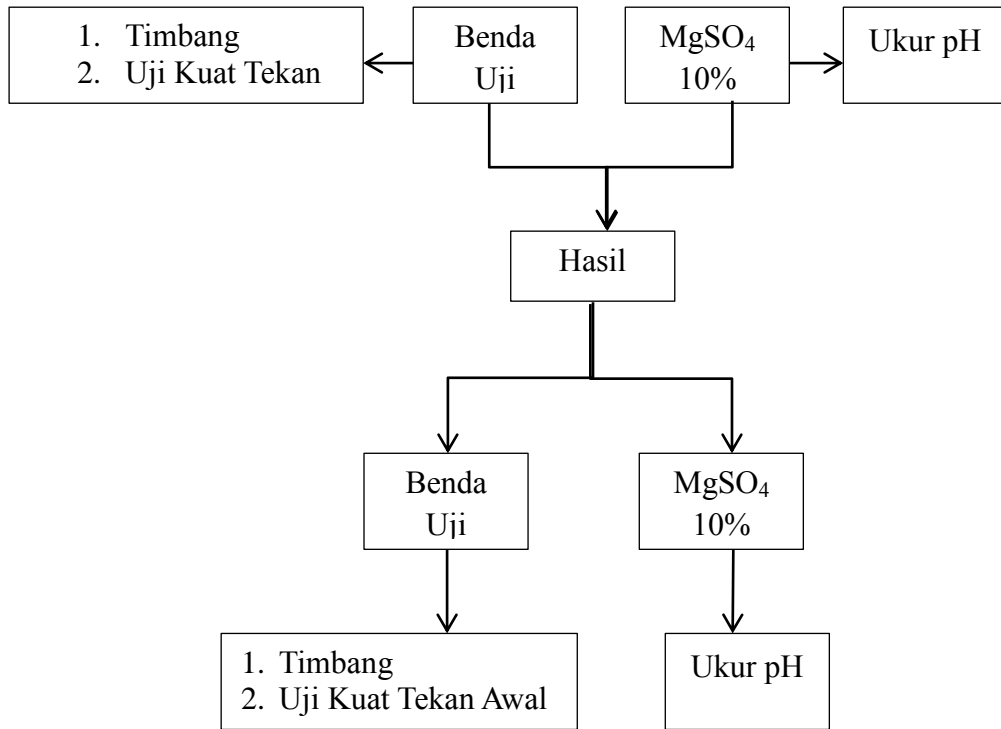
### 3. Pembuatan Larutan Alkali



#### 4. Sintesis Geopolimer



5. Penentuan ketahanan Terhadap Serangan Garam Magnesium Sulfat dan Kapasitas Netralisasi Asam (KNA)



## Lampiran 2. Perhitungan rasio mol SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dari Abu Layang

Mol SiO<sub>2</sub> berasal dari abu layang

$$\text{Mol SiO}_2 \text{ abu layang} = \frac{\text{massa SiO}_2 \text{ dalam abu layang}}{\text{Mr SiO}_2}$$

$$\text{Massa SiO}_2 \text{ dalam abu layang} = \frac{38,08 \times 33}{100} = 12,566 \text{ gram}$$

$$\text{Mol SiO}_2 \text{ abu layang} = \frac{12,5664}{60} = 0,20944 \text{ mol}$$

Mol Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berasal dari abu layang

$$\text{Mol Al}_2\text{O}_3 \text{ abu layang} = \frac{\text{massa Al}_2\text{O}_3 \text{ dalam abu layang}}{\text{Mr Al}_2\text{O}_3}$$

$$\text{Massa Al}_2\text{O}_3 \text{ abu layang} = \frac{14,50 \times 33}{100} = 4,785 \text{ gram}$$

$$\text{Mol Al}_2\text{O}_3 \text{ abu layang} = \frac{4,785}{102} = 0,047 \text{ mol}$$

Jadi, rasio mol SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> abu layang adalah 4,465 mol.

## Lampiran 3. Perhitungan Rasio Mol SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Berasal dari Abu Layang dan Natrium Silikat.

Mol SiO<sub>2</sub> total = mol SiO<sub>2</sub> dalam abu layang + mol SiO<sub>2</sub> dalam Na Silikat

$$\text{Mol SiO}_2 \text{ total} = \frac{\text{massa SiO}_2 \text{ dalam abu layang}}{60} + \frac{\text{massa SiO}_2 \text{ dalam Na Silikat}}{60}$$

$$\text{Massa SiO}_2 \text{ dalam Na Silikat} = \frac{37,2}{100} \times 10 \text{ gram} = 3,72 \text{ gram}$$

$$\text{Mol SiO}_2 \text{ total} = \frac{12,5664}{60} + \frac{3,72}{60} = 0,27 \text{ mol}$$

$$\text{Mol Al}_2\text{O}_3 \text{ abu layang} = \frac{4,785}{102} = 0,047 \text{ mol}$$

Jadi rasio mol SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> total adalah 5,78 mol;

## Lampiran 4. Perhitungan Berat Pati Ketela Pohon dalam Prosentase Solid Geopolimer

$$0\% \text{ Pati Ketela Pohon} = \frac{0 \times 33}{100} = 0 \text{ gram}$$

$$0,5\% \text{ Pati Ketela Pohon} = \frac{0,5 \times 33}{100} = 0,165 \text{ gram}$$

$$1,0\% \text{ Pati Ketela Pohon} = \frac{1 \times 33}{100} = 0,33 \text{ gram}$$

$$1,5\% \text{ Pati Ketela Pohon} = \frac{1,5 \times 33}{100} = 0,495 \text{ gram}$$

$$2,0\% \text{ Pati Ketela Pohon} = \frac{2 \times 33}{100} = 0,66 \text{ gram}$$

$$2,5\% \text{ Pati Ketela Pohon} = \frac{2,5 \times 33}{100} = 0,825 \text{ gram}$$

$$3,0\% \text{ Pati Ketela Pohon} = \frac{3 \times 33}{100} = 0,99 \text{ gram}$$

#### **Lampiran 5. Perhitungan Standarisasi NaOH Teknis dengan Asam Oksalat**

Buat larutan asam oksalat dengan melarutkan 0,3150 gram asam oksalat (Merck 99%) dalam akuades sampai 50 mL.

Konsentrasi larutan Asam Oksalat

$$M \text{ asam oksalat} = \frac{0,3150 \text{ gram}}{126 \text{ gram/mol}} \times \frac{1000}{50 \text{ mL}} = 0,05 \text{ M}$$

Membuat larutan NaOH teknis dengan cara melarutkan 1,0031 gram NaOH dalam akuades sampai 250 mL.

Konsentrasi larutan NaOH perkiraan

$$M \text{ NaOH perkiraan} = \frac{1,0031}{40 \text{ gr/mol}} \times \frac{1000}{250 \text{ mL}} = 0,1 \text{ M}$$

Volume rata-rata NaOH hasil titrasi = 10,33 mL

mmol asam oksalat = mmol NaOH

$$M_{\text{Asam Oksalat}} \times V_{\text{Asam Oksalat}} \times n_{\text{Asam Oksalat}} = M_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} \times n_{\text{NaOH}}$$

$$0,05 \text{ M} \times 10 \text{ mL} \times 2 = M_{\text{NaOH}} \times 10,33 \text{ mL} \times 1$$

$$M_{\text{NaOH}} = 0,097 \text{ M}$$

$$\text{Mol NaOH} = 0,097 \text{ M} \times 250 \text{ mL} = 24,25 \text{ mmol} = 0,02425 \text{ mol}$$

$$\text{Massa NaOH} = \text{mol} \times M_r$$

$$\text{Massa NaOH} = 0,0225 \text{ mol} \times 40 \text{ gram/mol} = 0,97 \text{ gram}$$

$$\% \text{NaOH} = \frac{0,97}{1,0031} \times 100\% = 96,7\%$$

### Lampiran 6. Analisis Kadar Amilopektin Pati Ketela Pohon

Perhitungan Amilopektin

$$\text{Amilosa} = \frac{x \text{ Fp}}{\text{Berat sampel (mg)}} \times 100\%$$

$$x = \frac{-a}{b}$$

$$x = \frac{0,404 - 0,016}{0,303}$$

$$x = 1,28$$

$$\text{Amilosa} = \frac{1,28 \times 20}{110,3} \times 100\%$$

$$\text{Amilosa} = 23,21 \%$$

$$\% \text{ Amilopektin dari fraksi pati} = \% \text{ pati} - \% \text{amilosa}$$

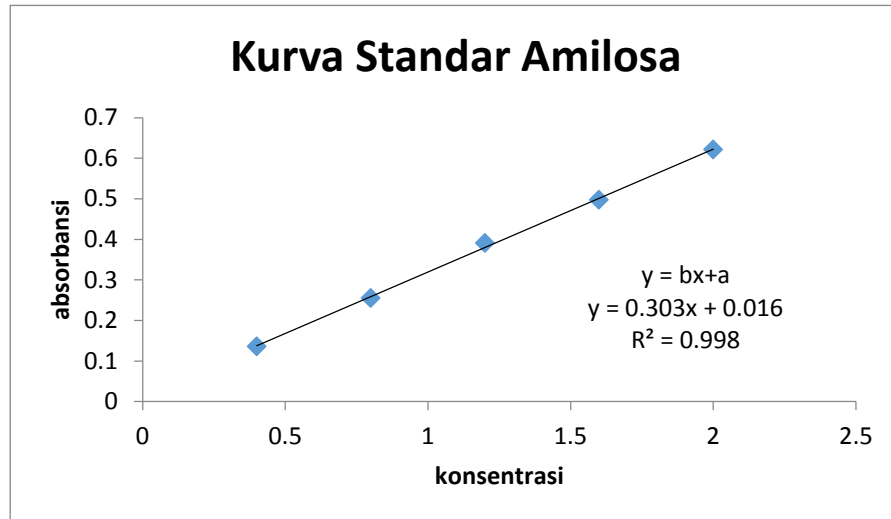
$$\% \text{ Amilopektin dari fraksi pati} = 72,774 - 22,575 = 50,199\%$$

$$\% \text{ Amilopektin dari fraksi pati} = 100\% \text{ pati} - \% \text{Amilosa}$$

$$\% \text{ Amilopektin dari fraksi pati} = 100\% \text{ pati} - 23,21\% = 76,79\%$$

Kode Sampel	Berat Sampel (gram)	Kadar Pati (%)	Absorbansi	Fp	Kadar Amilosa (%)	Amilopektin fraksi beras ketan (%)
Pati Ketela Pohon 1	0,1103	72,774	0,404	20	22,575	50,199
Pati Ketela Pohon 2	0,1103	72,527	0,407	20	22,749	49,778





#### Lampiran 7. Hasil Viskositas dan Waktu Alir Sampel Geopolimer

No	Sampel	Viskositas (Pa.s)	Waktu alir (s)
1	0,0%	0,105	31,24
2	0,5%	0,357	36,33
3	1,0%	0,504	41,39
4	1,5%	0,663	45,52
5	2,0%	1,072	52,73
6	2,5%	1,177	66,75
7	3,0%	1,404	75,45

#### Lampiran 8. Hasil Nilai Kuat Tekan dan Kuat Tarik

Kode Sampel	Nilai Kuat Tekan (Kgf)			Kuat Tekan Mpa			Rata-Rata
0%	232,301	272,849	282,158	8,254	9,695	10,026	9,325
0,5%	466,625	415,771	485,838	16,580	14,773	17,263	16,205
1%	925,658	876,718	980,952	32,890	31,151	34,855	32,966
1,5%	688,429	717,699	753,023	24,461	25,501	26,756	25,573
2%	440,904	476,173	484,206	15,666	16,919	17,205	16,597
2,5%	339,771	360,173	412,849	12,073	12,798	14,669	13,180
3%	279,407	308,722	294,626	9,928	10,969	10,469	10,455

Sampel	Nilai Kuat Tarik (Kgf)			Kuat Tarik Mpa			Rata-Rata
0%	96,463	98,003	85,609	0,857	0,871	0,760	0,829
0,5%	167,61	15,921	176,876	1,489	1,341	1,571	1,467
1%	269,99	292,494	278,821	2,398	2,598	2,477	2,491
1,5%	178,72	198,201	193,503	1,588	1,761	1,719	1,689
2%	148,43	175,609	156,123	1,318	1,560	1,387	1,422
2,5%	122,54	139,423	120,158	1,088	1,238	1,067	1,131
3%	89,83	101,463	103,061	0,794	0,901	0,915	0,870

### Lampiran 9. Tabel Analisis Waktu Pengerasan Geopolimer

Penambahan Pati Ketela Pohon (% b/b)	Waktu Pengerasan (jam)
0%	31,2
0,5%	36,5
1%	38,41
1,5%	40,31
2%	41,37
2,5%	44,27
3%	46,47

### Lampiran 10. Kuat Tekan Sebelum dan Sesudah Perendaman dengan Magnesium Sulfat 10%

Sampel	Berat Sebelum Perendaman (g)	Berat Sesudah Perendaman (g)	Kenaikan Berat (g)	Kuat Tekan Sebelum Perendaman (Mpa)	Kuat Tekan Sesudah Perendaman (Mpa)	Penurunan Kuat Tekan (%)
0%	24,909	26,147	1,238	9,325	6,845	26,595
1%	24,547	25,168	0,621	32,966	32,567	1,210
3%	24,627	25,541	0,914	10,455	9,251	11,516

**Lampiran 11. Kartu PDF (Powder Diffraction File) untuk penentuan jenis mineral dengan XRD (X-Ray Diffraction)**

**1. Mullite**

05-0258		Wavelength= 1.5418											
3Al2O3.2SiO2		2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l		
Aluminum Silicate		16.538	40	1	0	1	74.336	23	5	2	4		
Mullite		26.132	71	2	3	1	74.747	11	7	8	2		
Rad.: CuKα λ: 1.5418 Filter: Ni Beta d-sp:		26.368	100	2	4	0	75.303	20	4	11	1		
Cut off: Int.: I/cor.:		31.052	25	0	0	2	75.655	12	3	5	4		
Ref: Gillery, F., The Penn State Univ., Univ. Park, PA, USA, Private Communication		33.307	51	0	2	2	76.880	4	12	0	0		
Sys.: Orthorhombic S.G.:		35.336	60	0	6	0	77.027	9	6	1	4		
a: 14.88	b: 15.18	c: 5.75	A: 0.9802	C: 0.3788			37.151	17	4	4	1		
α:	β:	γ:	Z: mp:				39.344	24	0	4	2		
Ref: Ibid.							41.025	75	2	4	2		
Dx:	Dm: 3.160	SS/FOM: F <sub>30</sub> = (0.056, 404)					42.647	29	5	5	0		
ω: 1.638	ηβ: 1.642	ω: 1.653	Sign: +2V: 45-5°				43.073	7	3	6	1		
Ref: Data on Chem. for Cer. Use, Natl. Res. Council Bull. 107							48.280	9	1	6	2		
							49.625	12	2	8	0		
Color: White							53.592	7	7	0	2		
Pure synthetic material supplied by Rooksby; Rooksby, Partridge, Trans. Soc. Glass Tech., 23 338 (1939). Unit cell dimensions are uncertain; Bragg, At. Str. Minerals 170. Delete; Berry parcel February 25, 1964, for 15-776. Mwt: 426.05. Volume[CD]: 1298.60.							54.002	9	7	1	2		
							54.209	13	4	6	2		
							57.735	23	6	5	2		
							58.529	9	5	2	3		
							59.146	3	8	0	2		
							60.863	59	1	6	3		
							63.792	12	3	6	3		
							64.735	30	2	10	1		
							65.657	6	5	9	1		
							66.661	11	2	1	4		
							69.942	8	9	6	1		
							70.604	16	6	8	2		
							71.094	10	2	8	3		
							71.218	10	2	4	4		
							71.718	4	5	10	1		
							72.034	4	11	1	1		

1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

**2. Quartz**

05-0490		Wavelength= 1.54056											
α-SiO2		2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l		
Silicon Oxide		20.835	35	1	0	0	81.186	4	1	1	4		
Quartz, low		26.643	100	1	0	1	81.486	4	3	1	0		
Rad.: Cu λ: 1.54056 Filter: d-sp:		36.526	12	1	1	0	83.838	2	3	1	1		
Cut off: Int.: I/cor.: 3.60		39.455	12	1	0	2	84.941	<1	2	0	4		
Ref:		40.283	6	1	1	1	87.451	<1	3	0	3		
Sys.: Hexagonal S.G.: P3 <sub>1</sub> 21 (152)		42.443	9	2	0	0	90.823	4	3	1	2		
a: 4.913	b:	c: 5.405	A:	C: 1.1001			45.788	6	2	0	1		
α:	β:	γ:	Z: 3	mp:			50.166	17	1	1	2		
Ref: Ibid.							50.643	<1	0	0	3		
Dx: 2.649	Dm:	SS/FOM: F <sub>30</sub> = 78(.0125, 31)					54.864	7	2	0	2		
PSC: hP9. To replace 1-649. Deleted by 33-1161. Mwt: 60.08. Volume[CD]: 112.98.							55.330	3	1	0	3		
							57.244	<1	2	1	0		
							59.981	15	2	1	1		
							64.029	3	1	1	3		
							65.806	<1	3	0	0		
							67.748	7	2	1	2		
							68.140	11	2	0	3		
							68.309	9	3	0	1		
							73.460	3	1	0	4		
							75.654	4	3	0	2		
							77.697	2	2	2	0		
							79.891	5	2	1	3		
							80.084	2	2	2	1		

1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

### 3. Gibbsite

33-0018		Wavelength= 1.54060									
Al(OH) <sub>3</sub>		2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l
Aluminum Hydroxide		18.283	100	0	0	2	58.605	8	5	0	3
Gibbsite, syn		20.30	70	1	1	0	58.605	8	2	3	0
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.54060 Filter: d-sp: Diff.		20.549	50	2	0	0	59.494	3	2	0	6
Cut off: Int.: Diffract. 1/lor.: 1.0		26.515	17	2	0	2	62.512	4	2	1	6
Ref: Cisar, A., Poulsen, K., Dow Chemical Company, Freeport, TX, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1979)		26.896	30	1	1	2	62.512	4	2	3	2
Sys.: Monoclinic S.G.: P2 <sub>1</sub> /n (14)		28.011	25	1	1	2	63.800	30	3	2	4
a: 8.6552	b: 5.0722	28.725	13	1	0	3	63.800	30	3	3	0
c: 9.7161	A: 1.7064	36.407	25	3	1	1	64.653	18	4	1	5
C: 1.9156		36.616	40	0	2	1	66.149	19	3	3	2
$\alpha$ : 94.607	$\gamma$ : Z: 8 mp:	37.083	15	0	0	4	66.650	13	3	1	6
Ref: Ibid.		37.684	55	3	1	1	67.817	6	3	3	2
Dx: 2.437	Dm: 2.400 SS/FOM: F <sub>30</sub> = 10(0.025 .113 )	38.318	4	1	2	1	68.883	10	0	2	6
$\omega$ : 1.577	$\eta\beta$ : 1.577 $\epsilon\gamma$ : 1.595 Sign: 2V: 0°	39.314	15	3	1	2	70.718	7	1	2	6
Ref: Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., I, 663 (1944)		40.108	20	0	2	2	71.111	4	2	2	6
		41.140	2	1	2	2	72.681	3	4	1	6
		41.691	27	3	1	2	77.430	3	6	2	2
		43.374	4	1	1	4	77.797	2	3	3	4
		44.167	40	3	1	3	78.613	6	4	2	5
		44.754	3	2	2	2	78.613	6	2	4	0
		45.440	28	0	2	3	78.954	7	1	4	2
		46.192	6	1	2	3	81.581	4	1	1	6
		46.192	6	2	2	2	84.541	4	6	2	4
		47.306	15	1	2	3	89.589	3	4	4	0
		50.548	30	3	2	2	90.719	4	6	3	2
		52.175	30	0	2	4					
		52.667	4	1	2	4					
		53.977	4	1	2	4					
		54.424	30	3	1	4					
		55.383	9	1	3	0					
		55.383	9	2	2	4					
		57.851	7	4	1	4					
		58.095	7	3	1	5					

1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

29-0041		Wavelength= 1.54050									
Al(OH) <sub>3</sub>		2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l
Aluminum Hydroxide		18.265	100	0	0	2	54.487	5	4	0	4
Gibbsite		20.257	36	1	1	0	55.324	2	2	2	4
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.54050 Filter: d-sp: Calculated		20.503	18	2	0	0	57.780	2	2	2	4
Cut off: Int.: Calculated 1/lor.: 1.58		26.465	5	2	0	2	57.987	2	5	1	2
Ref: Smith, D., Fausey, Penn State University, University Park, Pennsylvania, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1977)		26.847	9	1	1	2	58.499	2	2	3	0
Sys.: Monoclinic S.G.: P2 <sub>1</sub> /n (14)		27.954	7	1	1	2	63.683	5	3	3	0
a: 8.684	b: 5.078	28.679	3	2	0	2	64.533	3	6	0	0
c: 9.736	A: 1.7101	36.325	7	3	1	1	66.023	4	3	3	2
C: 1.9173		36.555	12	0	2	1	66.341	2	5	1	4
$\alpha$ : 94.54	$\gamma$ : Z: 8 mp:	37.023	4	0	0	4	66.533	4	3	1	6
Ref: Saalfeld, H., Wedde, Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., 139, 129 (1974)		37.618	16	3	1	1	66.915	2	5	2	2
Dx: 2.421	Dm: SS/FOM: F <sub>30</sub> = 87(.0031 .112 )	39.238	4	3	1	2	68.746	2	0	2	6
		40.038	6	0	2	2	68.930	2	1	3	4
		40.169	4	3	0	3					
		41.601	7	3	1	2					
		41.803	5	1	1	4					
		44.094	12	3	1	3					
		44.436	8	4	0	2					
		45.368	8	0	2	3					
		45.522	6	4	1	0					
		46.109	2	2	2	2					
		47.313	5	3	1	3					
		50.449	10	3	1	4					
		50.774	6	4	1	2					
		52.092	9	0	2	4					
		54.330	7	3	1	4					

1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

#### 4. Sodalite

02-0341		Wavelength= 1.54056									
Al <sub>6</sub> Na <sub>8</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Cl <sub>2</sub>		2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l
Aluminum Sodium Silicate Chloride		9.648	70	1	0	0	59.597	30	4	4	1
		10.807	20				60.457	20	5	3	0
		12.317	20				61.797	60	5	3	1
Sodalite		13.869	80	1	1	0	63.202	70	6	1	0
Rad.: MoKα λ: 0.709 Filter: d-sp:		15.671	40								
Cut off: Int.: l/lor.:		19.364	40	2	0	0					
Ref: ICI Imperial Chemical Industries		21.873	30	2	1	0					
		24.164	100	2	1	1					
		25.955	70								
		27.593	40	2	2	0					
		30.698	40	3	0	0					
Sys.: Cubic S.G.:		31.361	60	3	1	0					
a: 8.89 b: c: A: C:		32.054	60								
α: β: γ: Z: mp:		33.279	40	3	1	1					
Ref: Ibid.		34.466	90	2	2	2					
		35.891	40	3	2	0					
		37.280	60	3	2	1					
		40.040	70	4	0	0					
Dx: Dm: 2.270 SS/FOM: F <sub>25</sub> = 5(0.160 , 31)		42.401	80	4	1	0					
		47.045	70	4	2	1					
		49.785	40	4	2	2					
ω: φ: 1.487 σ: Sign: 2V:		51.594	70	4	3	0					
Ref: Elements of Optical Mineralogy		52.551	40	5	1	0					
		53.546	30	5	1	1					
		54.231	20								
Color: Blue		55.658	30	5	2	0					
Delete: Berry parcel of January 20, 1959. Mwt: 969.21.		57.953	70	4	4	0					
Volume[CD]: 702.60.											

ICDD . 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

#### 5. Kaolinite

29-1486		Wavelength= 1.5416									
Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>		2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l
Aluminum Silicate Hydroxide		12.467	100	0	0	1					
		20.135	60b	1	1	0					
		25.012	100	0	0	2					
Kaolinite-1Md		35.179	25	1	3	0					
Rad.: CuKα λ: 1.5418 Filter: Ni Beta d-sp:		36.055	30	2	0	0					
Cut off: Int.: Diffract. l/lor.:		38.993	5								
Ref: Brindley, G., Penn State Univ., University Park, PA, USA.		37.881	20	0	0	3					
ICDD Grant-in-Aid. (1977)		38.694	40	1	1	3					
		41.025	5	2	0	1					
		45.827	10	2	2	1					
		48.198	6	0	4	2					
Sys.: Monoclinic S.G.: C <sub>2h</sub> /a (12)		51.112	6	0	0	4					
a: 5.16 b: 8.93 c: 7.39 A: 0.5778 C: 0.8275		54.664	12	1	5	0					
α: β: 104.5 γ: Z: 2 mp:		55.162	16	2	0	4					
Ref: Robertson, R. et al., Am. Mineral., 39, 118 (1954)		60.077	3	1	1	4					
		62.407	30	0	6	0					
		63.988	5	3	3	0					
		65.244	3	0	0	5					
		68.033	3	0	6	2					
Dx: 2.601 Dm: SS/FOM: F <sub>20</sub> = 2(0.112 , 87)		72.161	3	2	0	4					
		73.796	6	4	0	2					
Specimen from Pugu, Tanganyika. Q=impurity, probably quartz.											
Kaolinite-serpentine group, dioctahedral subgroup. C.D.											
Cell: a=7.390, b=8.930, c=5.160, β=104.50, a/b=0.8275,											
c/b=0.5778, S.G.=A <sub>2</sub> /a, FSC: mC34. See original PDF card for											
Graphical diffractometer trace. To replace 6-221. Mwt:											
258.16. Volume[CD]: 329.68.											

ICDD . 1997 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 1.30

## 6. Maghemite

39-1346		Wavelength= 1.5405 *								
Fe2O3	2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l
<b>Iron Oxide</b>	14.957	5	1	1	0	85.334	-1	[ 7 2 1]		
	18.383	4	1	1	1	87.300	2	[ 6 4 2]		
	23.770	5	2	1	0	89.240	-1	[ 7 3 0]		
<b>Maghemite-C, syn</b>	26.101	5	2	1	1	90.221	7	[ 7 3 1]		
<b>Rad.: CuK<math>\alpha</math> 1: 1.54178 Filter: Graph Mono d-sp: Diff.</b>	30.239	35	2	2	0	95.099	3	[ 8 0 0]		
	32.123	2	2	2	1					
<b>Cut off: 15.0 Int.: Diffract. I/Icor.: 1.4</b>	33.881	2	3	1	0					
	35.629	100	3	1	1					
<b>Ref: Schulz, D., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid, (1987)</b>	37.248	3	2	2	2					
	38.845	1	[ 3 2 0]							
	40.375	1	[ 3 2 1]							
<b>Sys.: Cubic S.G. F<math>\bar{4}32</math> (213)</b>	43.282	16	4	0	0					
<b>a: 8.3515(22) b: c: A: C:</b>	44.702	1	4	1	0					
<b>o: <math>\beta</math>: <math>\gamma</math>: Z: 10.66 mp:</b>	46.069	-1	[ 3 3 0]							
	50.005	2	4	2	1					
<b>Ref: Lindsley, D., Min. Soc. of America, Short Course Notes (Wash., D.C.), 3, L-18 (1976)</b>	53.730	10	4	2	2					
	54.922	1	4	3	0					
	56.103	1	[ 5 1 0]							
	57.269	24	5	1	1					
<b>Dx: 4.856 Dm: 4.900 SS/FOM<math>_{30}</math> = 9:(.0090, 3)</b>	59.565	1	5	2	0					
<b>ex: <math>\eta_{001}</math>: 2.74 <math>\epsilon_r</math>: Sign: 2V:</b>	60.682	2	5	2	1					
<b>Ref: Deer, W., Howie, R., Zussman, J., Rock Forming Minerals, 5, 73 (1961)</b>	62.922	34	4	4	0					
	63.991	1	4	4	1					
	65.069	1	5	3	0					
	67.198	-1	[ 4 4 2]							
<b>Color: Light brown</b>	68.250	1	[ 6 1 0]							
<b>Peak height intensity. Sample from Control Data as used in hard disks. Space group dependent upon preparation (Bernal et al.). Optical data on specimen from Iron Mountain, Shasta County, California, USA. Pattern reviewed by Syvinski, W., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1990). Agrees well with experimental pattern. Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed; <math>(I_{001}) = 10.067</math>. Spinel group, related structures subgroup. Silicon used as an internal stand. Single-crystal data used. PSC: cP53.33. To replace 4-755 and 24-81. Mwt: 159.69. Volume[CD]: 582.50.</b>	69.302	1	6	1	1					
	71.372	3	6	2	0					
	72.398	1	5	4	0					
	74.467	5	5	3	3					
	75.439	2	6	2	2					
	76.439	-1	[ 6 3 0]							
	77.439	-1	[ 6 3 1]							
	79.442	1	4	4	4					
	80.419	-1	[ 6 3 2]							
	81.416	1	7	1	0					



## Lampiran 12. Dokumentasi



Pengayakan Abu Layang



Pasta Geopolimer dalam Cetakan



Pengukuran Viskositas



Pengujian Kuat Tarik Belah



Perendaman dalam  $MgSO_4$



Pengukuran pH  $MgSO_4$